

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ігоря Сікорського»

МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА ЛАЗЕРНОЇ ТЕХНІКИ ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

БОВА АНДРІЙ ІВАНОВИЧ

УДК 621.375.826:621

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОЛІСНИХ ПАР
РУХОМОГО СКЛАДУ З ВИКОРИСТАННЯМ
ВИСОКОКОНЦЕНТРОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ**

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістр

На правах рукопису

*Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань*

Київ – 2018

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	3
ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. Аналіз можливих методів підвищення експлуатаційних властивостей колісних пар.....	6
1.1 Особливості взаємодії пари колесо-рейка	6
1.2. Загальна характеристика методів зміцнення.	12
1.2.1. Хіміко-термічна обробка.....	13
1.2.2. Поверхнєве пластичне деформування.....	16
1.2.3. Термічна обробка	19
1.2.3.1. Лазерна обробка	20
1.2.3.2. Плазмова обробка.....	22
1.2.4. Поверхнєве легування.....	23
1.2.4.1. Електроіскрове легування.....	23
Висновки до розділу 1	27
РОЗДІЛ 2. Теоретичне обґрунтування режимів термодформаційного зміцнення сталі М76.....	29
2.1. Теплофізична модель нагрівання	29
2.2. Фізико-хімічний аналіз	33
Висновки до розділу 2	37
РОЗДІЛ 3. Методика проведення експериментальних досліджень	38
1.1. Методика та режими лазерного термодформаційного зміцнення.....	38
1.2. Методика вимірювання мікротвердості	44
1.3. Методика вимірювання шорсткості.....	46
1.4. Методика вимірювання зносостійкості	47
Висновки до розділу 3	49
РОЗДІЛ 4. Результати експериментальних досліджень та їх обговорення	50
4.1 Металографічне дослідження зразків після комбінованого зміцнення .	50
4.2. Схеми комбінованої лазерно-термодформаційної обробки колісних пар.	58
Висновки до розділу 4	62
РОЗДІЛ 5. Стартап-проект.....	64

5.1 Опис ідеї послуги	66
4.2 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї.....	67
4.3 Технологічний аудит ідеї проекту.....	68
4.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	69
4.5 Фактори, що сприяють ринковому впровадженню	71
4.6 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	77
5.7 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	80
Висновки до розділу 5	80
ВИСНОВКИ	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ	84

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ППД – поверхнево-пластичне деформування

ХТО – хіміко-термічна обробка

УЗО – ультразвукова обробка

ЛТО – лазерна термічна обробка

ЗТВ – зона термічного впливу

ЗЛВ – зона лазерного впливу

ЕМО – електро-механічна обробка

ЧПК – числове програмне керування

КНБ – кубічний нітрид бору

ВСТУП

Підвищення експлуатаційних властивостей виробів, що працюють в екстримальних умовах є однією із важливих задач в машинобудуванні. Такі умови характерні для деталей, що працюють при високих швидкостях руху, високих контактних питомих тисках, дії абразивних та агресивних середовищ, циклічно змінних температур.

До таких виробів відносяться колісні пари транспортних засобів

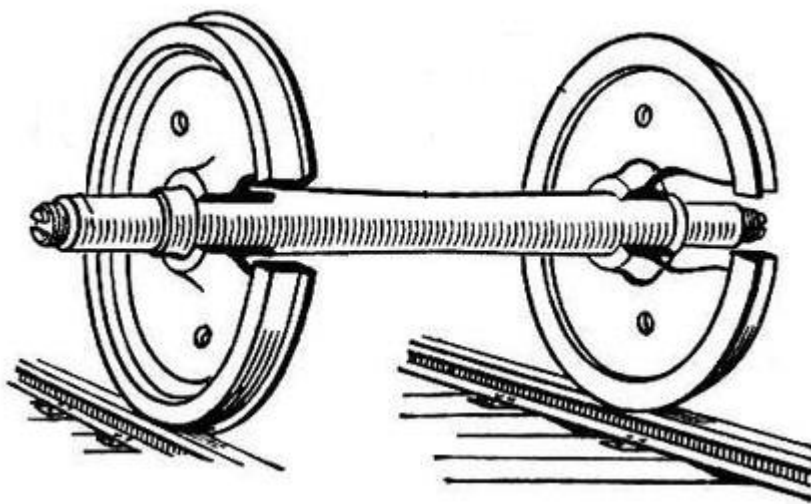


Рис. 1 Колісна пара залізничних транспортних засобів

Під час кочення коліс по поверхні колії виникають статичні й динамічні сили взаємодії між рухомим складом і залізничною колією, що передаються через зону контакту, площа якої становить біля одного квадратного сантиметра. У поверхневій частині цієї зони виникають контактні напруги й напруги зсуву, величина яких може перевищувати границю текучості металу. Цим екстремальним навантаженням протистоїть зміцнення металу, що супроводжується, однак, зношуванням як колеса, так і рейки.[1]

Надійність пар (колесо-рельса) в першу чергу визначається довговічністю, тому першочергове значення має підвищення їх зносостійкості. Використання високоміцних, в тому числі і легованих сталей

не завжди задовільняє вимоги до високих експлуатаційних властивостей таких виробів. Зокрема використання традиційних методів зміцнення не дозволяє отримати необхідні показники поверхневого шару, а також вичерпують свої можливості для підвищення зносо- та корозійної стійкості виробів, що працюють за екстримальних умов.

В сучасному виробництві деталей машин стали частіше використовуватись перспективні методи зміцнювальної та оздоблювальної обробки – комбіновані та гібридні термодформаційні процеси, що поєднують нагрівання поверхонь лазерним, електронним чи плазмовим джерелами енергії та поверхневе пластичне деформування (ППД). Серед методів ППД найчастіше використовують обкатування кулькою або роликом в статичному чи динамічному режимах.

Об'єкт дослідження – процеси лазерного термодформаційного зміцнення колісних пар транспортних засобів, виготовлених із сталей, легованих марганцем для підвищення зносостійкості.

Предмет дослідження – параметри зміни фізико-механічних властивостей (твердості, шорсткості, зносостійкості) в поверхневому шарі марганцевої сталі в умовах сканувального лазерного променя, та комбінованої лазерно термодформаційної дії.

Методи досліджень – вимірювання мікротвердості зміцнених виробів; оптична металографія структур; вимірювання параметрів якості поверхні; випробовування на зносостійкість.

Наукова новизна отриманих результатів. В дисертаційній роботі проведено дослідження процесів комплексного лазерного термодформаційного зміцнення поверхонь

1.1 Особливості взаємодії пари колесо-рейка

Рейки мають володіти високою міцністю та зносостійкістю, мати високі моменти інерції і супротиву, мати високу контактну-втомну витривалість. Необхідні фізичні властивості досягаються за рахунок використання високовуглецевих сталей, легованих марганцем, та технології виготовлення рейок – прокату, та подальшого об'ємного гартування.

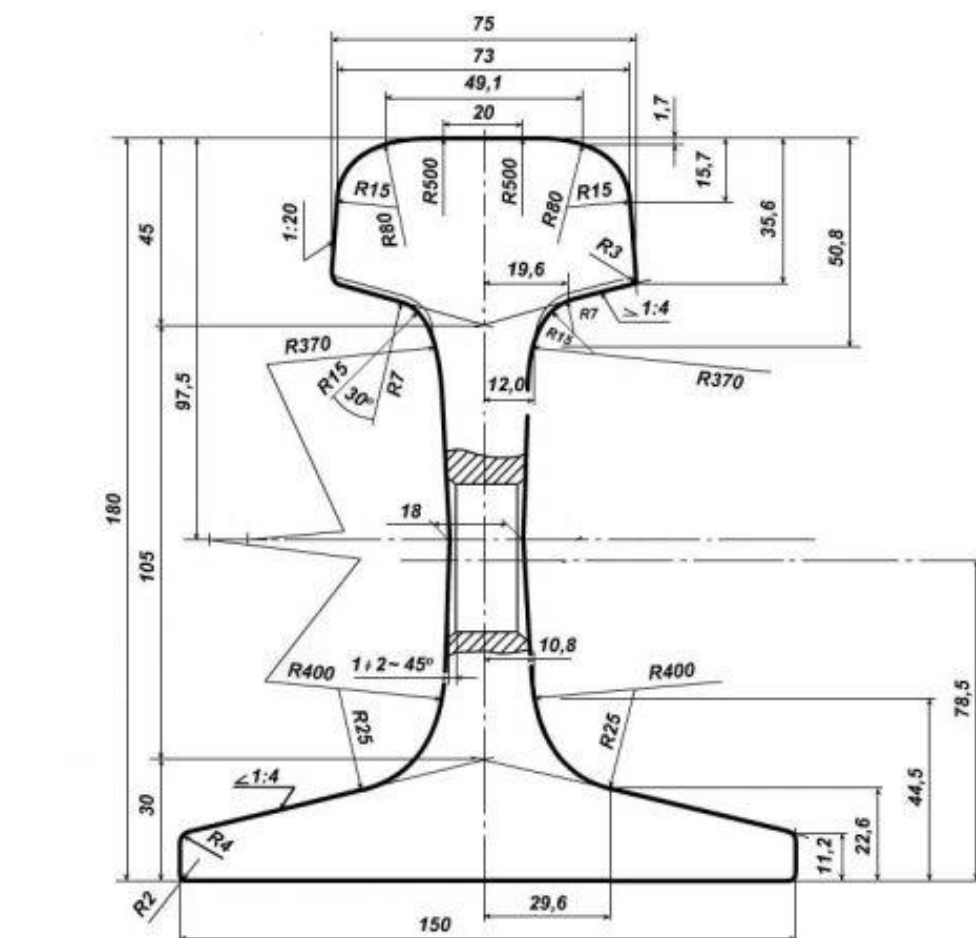


Рис 1.1 Профіль рейки типу Р65

Колеса можуть бути виконані одним з двох способів, тому розрізняють цільнокатані та цільновилиті колеса. Цільнокатаним колесам притаманні кращі механічні властивості та показники експлуатаційної надійності використовуються для вагонів з відносно невеликими навантаженнями на вісь (до 228 кН) та виготовляються зі сталей з ударною в'язкістю 0,2-0,3 МДж/м². Певна пружність за рахунок матеріалу та геометрії колеса дозволяє зменшити динамічні навантаження.

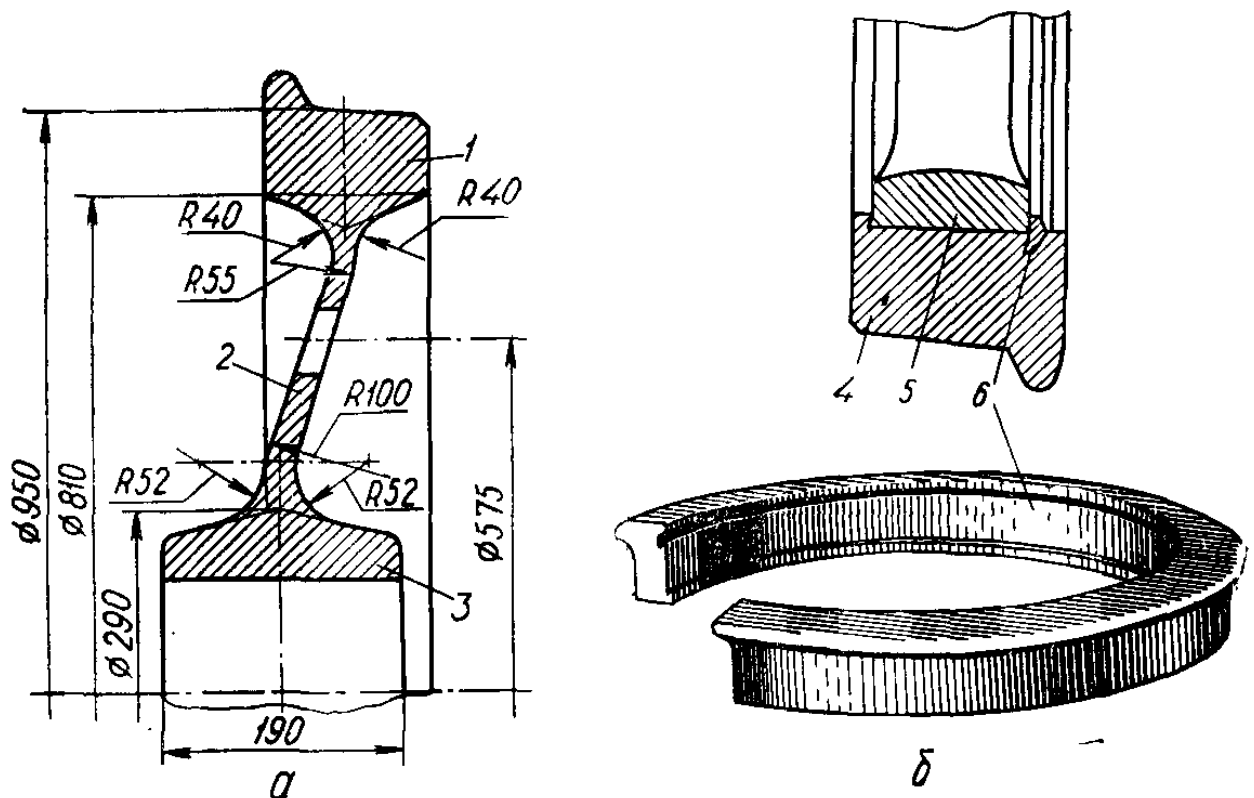


Рис 1.2 Профіль колеса (а), обода (б).

1 – обод, 2 – диск, 3 – ступиця, 4 – бандаж, 5 – ступиця, 6 - кільце запобіжне

Робоча частина колеса піддається переривчастому закалюванню з подальшим відпуском для підвищення зносостійкості. Після термічної обробки колесо має, фіксовані нормами, механічні властивості – опір навантаженню 880-1080 МН/м², відносне видовження не більше 10%, відносне звуження не більше 16% твердість HB 2430

Питання взаємодії пари колесо-рейка є найголовнішим при прогнозуванні проблем руху, контакт даної пари має забезпечувати невисокі значення сил тертя, але і одночасно достатні для щеплення і утворення необхідної сили тяги. Для вирішення даної задачі необхідно чітко розуміти вплив та взаємозв'язки силових та геометричних параметрів системи колесо – рейка.

Від колеса рухомого складу передається високе навантаження, що в залежності від характеру дії ділиться на статичне та динамічне. Статичне навантаження є наслідком дії сил, нормальних до поверхні рейки, що є наслідком дії тяжіння при нерухомому складі, допустиме навантаження на одну вісь для локотива складає 250 кН, і 235 кН для вантажних вагонів.

Динамічне навантаження виникає при русі рухомого складу і є непостійною величиною, що змінюється під впливом тисяч різноманітних факторів. Одні виникають за рахунок недосконалої геометрії місця дотику пари колесо-рейка, інші за рахунок пружних деформацій елементів конструкції вагонів та колій.

Сумарне значення навантажень залежить від особливостей конструкції ходових частин визначених рухомих складів, колії, якістю технічного обслуговування, швидкості руху, маси що припадає на вісь, тощо. Динамічні навантаження можуть досягати значень в 1,5-2 рази вищих за статичні а на деяких участках шляху і в 3-4 рази, через дію горизонтальних поперечних сил. Дані сили можуть бути результатом передачі через раму сил, що діють на кузов (близько 6-7 кН), та найбільшого значення досягають бокові зусилля, що виникають між гребенями коліс та рейками при проході криволінійних участків дороги. Горизонтальні повздовжні сили менш суттєві і виникають при гальмуванні та зміні температури. [2]

При дослідженні напруження розглядають його нормальну і тангенціальну складову на площадці контакту. Згідно праці У. Дж. Харріса [3] контакт між колесом і рейкою відбувається на квазіеліптичній площадці

розмірами близько 13мм. На цій ділянці метал піддається тиску колеса (нормальна складова) і є рівномірно розподіленим так як є результатом сил тяжіння/реакції опори. При русі складу положення колісної пари відносно рейки змінюється, тому і змінюється форма і кількість контактних зон, можливі комбінації контактів поверхні катання і зовнішніх частин головки рейки з центральною областю чи гребнем колеса.

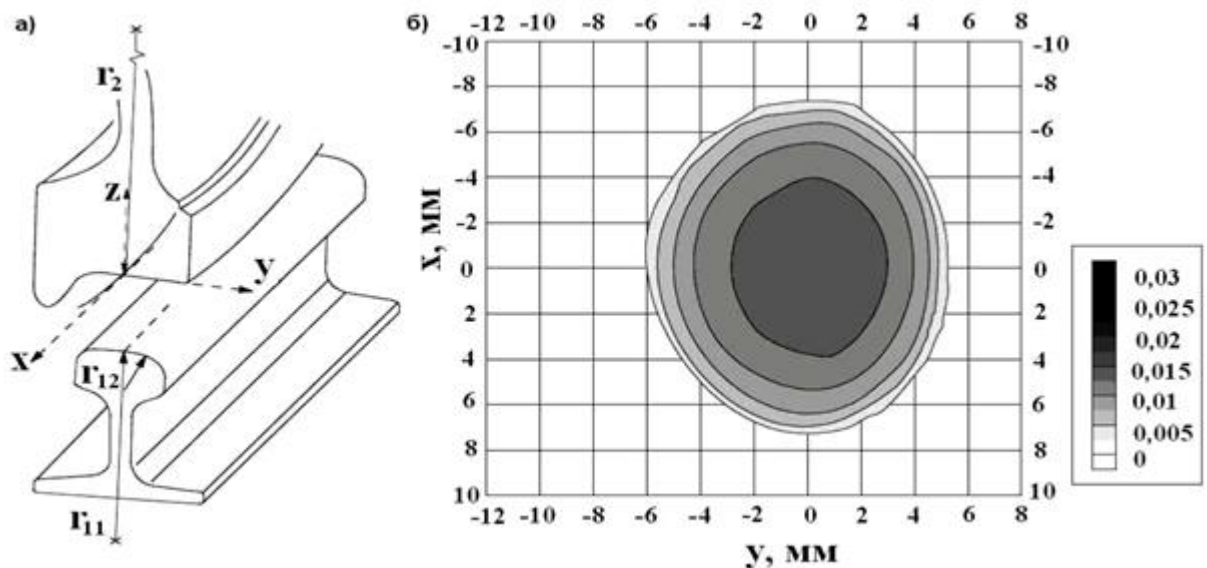


Рис.1.3 Колісна пара.

а - геометрія контакту, б - форма площадки контакту та розподіл напружень; x, y, z – вісі системи, r_{11}, r_{12}, r_1, r_2 – характерні радіуси колеса та рейки,

Максимальне контактне напруження може бути розраховане за формулою[4]:

$$P_{max} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F \cdot E^2}{2 \cdot \pi^3 \cdot r_e^2 \cdot (1 - \nu^2)^2}} \quad (1)$$

де E – модуль пружності;

F – нормальна сила навантаження колеса і рейки;

r_e - еквівалентний радіус, що залежить від характерних радіусів взаємодії колеса і рейки в зоні контакту;

ν – коефіцієнт Пуассона;

Таким чином нормальне напруження на поверхнях катання залежить від навантаження колеса на рейку, радіусів поверхонь катання, розміру площадки контакту та фізико-механічних властивостей матеріалів.

Дане рівняння (1) має місце якщо в області контакту є лише один радіус кривизни поверхні. В умовах реальних виробів спостерігаються недосконалості геометрії готових виробів, на набуті вади в наслідок спрацювання. Для визначення напружень між колесом і рейкою використовують методи моделювання приймаючи колесо і рейку за пружні тіла, а напруження пропорційним деформації. Розглядаються різні варіанти профілю рейки, поперечного та кутового положення одного відносно іншого, куту нахилу рейки. Результати показують, що напруження в 1,3 рази більші ніж при рішенні рівняння (1).

При проходженні криволінійних участків шляху рухомим складом спостерігається набігання колеса на рейку і як наслідок контакт відбувається в двох точках – на поверхні катання рейки та на боковій поверхні головки рейки.

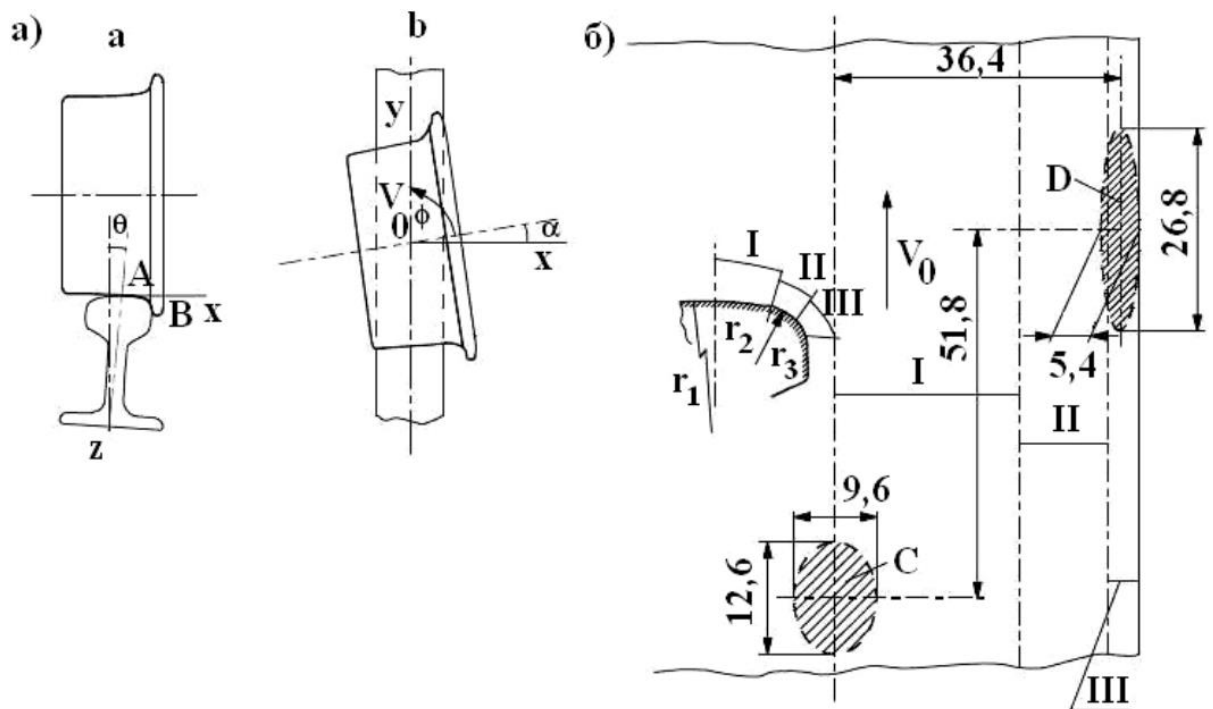


Рис 1.5 Взаємодія колеса і рейки.

а – положення колеса на рейці, б – розміри площадок контакту при двохточковому контакті; А, В – точки контакту колеса і рейки; x, y, z – вісі координат; α – кут набігання; θ – кут нахилу рейки; V_0 – вектор швидкості руху колісної пари; С, D – площадки контакту; I, II, III – області контакту; r_1, r_2, r_3 – радіуси кривизни головки рейки

Збільшення кута набігання призводить до збільшення відстані між площадками контакту і моментальною віссю обертання і це призводить до відносного проковзування та зростання відповідної тангенціальної сили. В зоні дотику гребня та зовнішньої частини головки рейки величина контактних напружень може сягати 3000 МПа.

При контакті колісних пар застарілої конструкції, з дефектами після виготовлення, зношених чи зношеної та нової поверхонь катання відбуваються зміни форми та суттєве зменшення площадки контакту, що призводить до збільшення контактних напружень.

На практиці при двохточковому контакті колеса і рейки зона на поверхні сприймає лише вертикальні навантаження, а зона на гребні та

боковій частині головки лише горизонтальні. При середньостатистичному навантаженні на вісь в 18 т, профілям коліс та рейок тиск на поверхні катання складає 600-800 Н/мм². Вважається, що зусилля на гребнях/бокових частинах головки досягають 0,96 від нормальних навантажень на колесо/рейку, і хоч значення і одного порядку та в наслідок характеру взаємодії в результаті високих тангенціальних напружень, тертя від проковзування в гребнях коліс та боковій частині головки рейки створюються умови, що перевищують границі міцності/текучості, що призводить до різного виду зносу. [4]

1.2. Загальна характеристика методів зміцнення.

Надійність пар (колесо-рельса) в першу чергу визначається довговічністю, тому першочергове значення має підвищення їх зносостійкості. Для цього були створені способи покращення зносостійкості та відновлення поверхонь тертя.

Для визначення найбільш дієвого з них необхідно провести аналіз існуючих методів.

Технологічні методи підвищення зносостійкості деталей машин можна об'єднати таким чином[5]:

- хіміко-термічна обробка: цементация, азотування, хромування, ціанування, алітування, сульфокіанування і сульфитація та інші;

- термічна обробка: плазмова поверхнева закалка, високочастотна закалка, поверхнева закалка з нагрівом в електроліті, лазерне зміцнення, електронний промінь;

- хімічна обробка: глибоке анодування, оксидація, фосфатація;

- поверхнєве пластичне деформування: обкочення кульками, твердосплавними роликами, дрібоструменева обробка, алмазне вигладжування, обробка поверхонь вибухівним навантаженням;

- електроіскрове зміцнення;

-гальванічні покриття: хромування, нікелювання, хромування, борирування, радирування, сріблювання, лудіння, свинцювання і покриття сплавами;

-хімічні покриття: нікелювання, хромування, покриття кобальтом і сплавами нікель-кобальт;

-засоби надання поверхні антифрикційних властивостей: графітування, наочування (поглиблення, канавки), нанесення покриття у вакуумі, нанесення дисульфиду молібдену, фрикційне латунювання, – ФАБО (фінішна антифрикційна, безабразивна обробка), покриття пластмасами (вихрова) і газополуменева обробка), металізація напиленням;

- наплавка: електродугова, електрошлакова, вібродугова.

1.2.1. Хіміко-термічна обробка

Останнім часом широке застосування отримала хіміко-термічна обробка(ХТО) та її складові. ХТО – процес нагріву металу, який поєднує у собі хімічні та термічні впливи на поверхневий шар металу з метою насичення матеріалу тим чи іншим елементом при високій температурі, в результаті чого відбувається зміна хімічного складу, мікроструктури і властивостей поверхневих шарів деталей.

В результаті цього процесу утворюється дифузійний шар, на поверхні якого концентрація елементу максимальна та зменшується в глибину металу (рис. 1.1). Глибина проникнення елементу і утворює шар з зміненими властивостями. Глибина дифузійного шару визначається величиною коефіцієнту дифузії, який збільшується з ростом температури. В процесі хіміко-термічної обробки товщина насиченого шару змінюється по параболічному закону.



Рис. 1.6. Зміна концентрації елементу, що продифундував по глибині металу[6]

Основні методи насичення при ХТО можна класифікувати так:

Насичення за допомогою порошкових сумішей (порошковий метод).

Метод дуже простий у експлуатації, використовується в малосерійному і серійному виробництві.

Прямоточний і циркуляційний методи дифузійного насичення із газового середовища.

Даний метод дозволяє регулювати активність насичуваної атмосфери. Використовується на великих підприємствах для цементації, нітроцементації і азотування. Забезпечує високу якість дифузійного шару і поверхню оброблюваного виробу.

Дифузійне насичення із розплавлених металів або солей, які містять дифузійний елемент (з електролізом і без його застосування).

Метод дозволяє скоротити тривалість технологічного процесу, але не завжди забезпечує високу якість поверхні і суцільність дифузійного шару.

Насичення із паст і суспензій (шлікерний спосіб).

Метод не має широкого застосування, так як не забезпечували отримання рівномірної товщини покриття і високої якості дифузного шару.

Дифузійне насичення з використанням вакууму.

Насичення відбувається у вакуумі при дуже високих температурах. Цей метод являється одним із найперспективніших методів ХТО.[6]

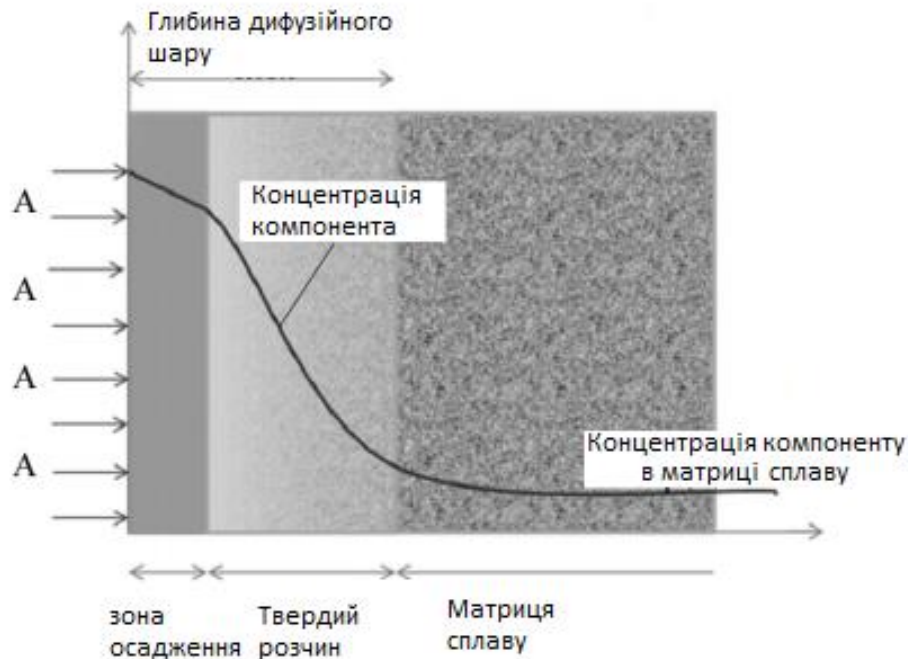


Рис. 1.7. Розподіл хімічного елементу в товщі сплаву після ХТО

Однак перераховані методи ХТО мають ряд загальних істотних недоліків як за технологією процесу, так і за властивостями оброблюваного шару. До числа основних недоліків, що обмежують застосування цих способів як методів обробки зміцнюючих поверхню, можна виділити.[7]:

1. Значну тривалість процесів (наприклад, швидкість насичення вуглецем порядку $2,8 \cdot 10^{-5}$ мм/с, а для отримання азотованого шару товщиною 0,5 мм в конструкційних сталях при температурах 500-520°C тривалість становить 50-70 ч). наслідком чого є мала продуктивність процесу і суттєве знеміцнювання серцевини деталі;
2. Деформацію і викривлення під дією напруг, які створюються умовами нагріву під час технологічного процесу і подальшого охолодження і, як наслідок, необхідність в додаткових операціях механічної обробки;

3. Крихкість і відлущування зовнішньої частини обробленого шару, в зв'язку з різким перепадом твердості між зміцненим шаром і матрицею.

Також недоліками перерахованих вище методів ХТО є невелика товщина легованого шару і погана його зв'язок зі структурою базового металу. При форсованих режимах експлуатації легований шар швидко зривається з поверхні металу.[7]

Відмінність ХТО від поверхневого пластичного деформування (ППД) полягає в незалежності від зовнішньої форми виробу. При поверхневому деформуванні при складних формах поверхні неможливо забезпечити рівномірний прогрів поверхневих шарів.

1.2.2. Поверхнєве пластичне деформування

Обробка матеріалу методом ППД складається з силового контактного впливу деформуючого інструменту на поверхню заготовки в умовах їх відносного руху. Даний спосіб заснований на механічному методі вихідного зміцнення, об'єднує способи обробки поверхонь без видалення шару матеріалу шляхом деформування мікронерівностей і глибинних прилеглих до поверхні шарів матеріалу. Виконується з метою підвищення опору втомі і твердості поверхневого шару металу і формування в ньому спрямованих внутрішніх напруг, переважно напруг стиснення, також регламентованого рельєфу мікронерівностей на поверхні. Загартування поверхневого шару металу сприяє підвищенню зносостійкості деталей, зменшує деформацію і стирання поверхонь при наявності і безпосередньому контакті.

Залежно від схеми силового впливу на поверхню матеріалу можна виділити кілька основних груп процесів ППД, які наведені на рис 1.8. та у табл.1.1.

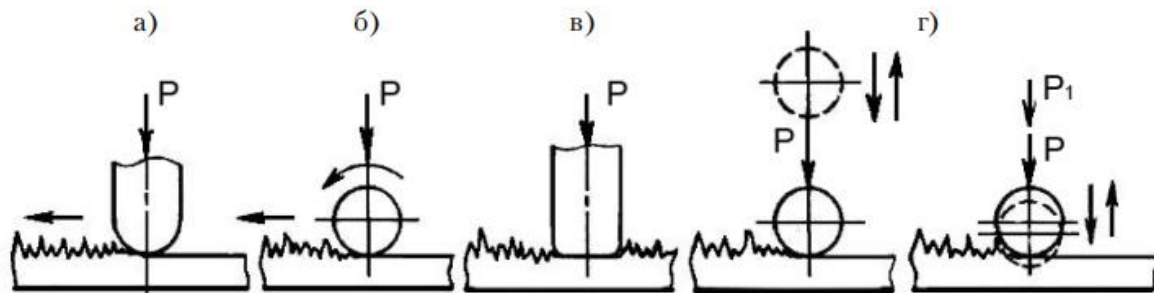


Рис. 1.8 Характер контактної взаємодії інструменту з оброблюваною поверхні при різних методах ППД: а) вигладжування; б) накочення; в) одноразове обтиснення оброблюваної поверхні; г) ударний метод.

Найбільшого поширення набули статичні методи ППД за рахунок простоти виконання і стабільності протікання процесу. До них входять дорнування, вигладжування і обкатування, при яких здійснюють безперервну контактну взаємодію інструменту із заготовкою в процесі взаємного переміщення.

Вигладжування є одним з найбільш простих способів поверхневого пластичного деформування за рахунок високої продуктивності і стійкості інструменту. Під час вигладжування досягається шорсткість $Ra = 0,32 \dots 0,10$ мкм, при обробці зростає мікротвердість і в поверхневому шарі створюються стискаючі залишкові напруги.

Процес алмазного вигладжування аналогічний точінню, тільки замість різця застосовується алмазний виглажувач, який пластично деформуючи поверхневий шар вирівнює і зміцнює його. Алмазне вигладжування в порівнянні з накочуванням має істотно меншу продуктивність, однак володіє більшою універсальністю і дозволяє обробляти менш жорсткі деталі, так як тиск при алмазного вигладжування $100 \dots 200$ Н, в той час як при накоченні він становить $10 \dots 100$ кН. [9]

Таблиця 1.1. Класифікація методів поверхневого пластичного деформування

Методи зміцнення поверхневим пластичним деформуванням	Статичне ППД	Накочення (розкочування кулькою, дисковим роликом)	Виглажування	Калібрування	Накочення з прослизанням
	Формотворче накочення	Накочення фасонних поверхонь, калібруюче накочення			
	Ударна обробка напівжорсткими елементами	Карбування кулькою, роликом або бойком	Відцентрова обробка кулькою і роликом		Обробка щітками
	Статичне ППД з накладення коливань, вібрацій	Ультразвукове ППД, вібраційні накочення і вигладжування			
	Комбіноване поверхнєве зміцнення	Суміщення методів ППД	Суміщення ППД з хіміко-термічною, термічною і гальванічною обробкою, іншими методами поверхневого зміцнення		
	Ударна обробка елементів з наплавленою траєкторією	Обробка мікрокульками і гідроабразивна. Зміцнення дробом			
	Ударна обробка вільними елементами	Віброгалтовка, галтовка і гідрогалтовка абразивом, металевими або скляними кульками			
	Суміщення ППД з різанням	Поєднання ППД з різанням		Випереджаюче ППД і різання	

Підвищити довговічність і витривалість виробів можливо створенням оптимальних полів залишкових напружень в тілі деталей. Одним з таких методів є метод термопластичного зміцнення. Завдання створення полів залишкових напружень вирішується в два етапи: спочатку визначається температурне поле, а потім розраховуються залишкові напруги і пластичні деформації.

Працездатність деталей підвищують застосуванням комбінованої обробки різними методами ППД, а також обробки методами ППД в поєднанні з іншими методами зміцнення.

Найширше поширення здобули динамічні способи зміцнення методом ППД. Вони мають велику різноманітність, простоту у виконанні, високу

ефективність й універсальність їх технологічних можливостей. Особливо широку галузь у застосуванні здобули дробоударні та абразивні способи. Їх ефективність та універсальність визначається у поєднанні в собі захисних та зміцнюючих процесів. Їх головна перевага – це саме технологічність і універсальність, що забезпечує можливість обробки будь-якої складності поверхонь деталей. Має величезну ефективність у обробці деталі після цементації, ціанування або гартування.

Різновидом дробоструменевої обробки є гідроструменеве зміцнення. Робочим середовищем у даному методі слугують трансформаторне масло в поєднанні з підшипниковими кульками. Надійність в результаті обробки підвищується в 7-8 разів. Стійкість – в 2-3 рази.

Досить прогресивним процесом зміцнення ППД – ультразвукова обробка(УЗО). Сутність процесу полягає в дії на оброблювану частину поверхні деталі, притиснутого до неї інструменту вібруючою силою із частотою

$$f=20000 \text{ Гц.}$$

Після УЗО загартованих сталей поліпшується шорсткість поверхні, поверхнева мікротвердість зростає на 30-40%, глибина наклепу становить від 0,65 до 0,3 мм. [10]

Однак, незважаючи на всі переваги, методи ППД не позбавлені недоліків. Здебільшого всі вони найбільш ефективні в дрібносерійне виробництво при обробці відповідальних деталей. Можливо замінювати фінішні процеси, наприклад шліфування або полірування з охолодженням, на методи ППД без застосування змащуючехолоджуючих матеріалів, але серед відомих методів ППД дуже важко знайти технологічний процес, який би задовольняв вимоги масового виробництва. [11]

1.2.3. Термічна обробка

Термічна обробка (ТО) відбувається під час інтенсивного охолодження виробу, нагрітого до температури вище критичної точки. Завданням даного

методу є збільшення міцності матеріалу, створення високоміцних і надміцних матеріалів, які характеризуються високою пластичністю і здатністю до зварювання.

Підвищення зносостійкості колісної пари методом ТО призводить до величезної (від 15 до 60%) економії металу. Прискорене охолодження матеріалу повинно збільшити його надійність за рахунок створення стискаючих напруг в зоні катання і більшої зносостійкості структури. В результаті інтенсивної дії на матеріал, його властивості збільшуються в 1,5-2 рази.

Переваги способу порівняно з методами хіміко-термічної обробки: можливість отримання на робочих поверхнях зносостійкого покриття високої твердості за рахунок того, що на поверхні охолодженого матеріалу виникає нова структура – мартенсит. [7]

1.2.3.1. Лазерна обробка

Одним із різновидів ТО є лазерна (світлопроменева) обробка. ЛО заснована на використанні високошвидкісного нагріву поверхневого шару металу. Даний метод дозволяє не тільки збільшити швидкість обробки, а й зменшити витрати матеріалу. Внаслідок відсутності механічної дії і наявності чіткої зони нагріву, матеріал суттєво збільшує свою міцність і не деформується. Під час переміщення променя на інші ділянки поверхні відбувається швидке охолодження уже нагрітої.

ЛО дозволяє вибірково збільшувати міцність саме тих ділянок поверхні, саме тих деталей, які в найбільшій мірі піддаються зносу при невеликій глибині впливу і зі збереженням вихідних властивостей матеріалу. Вона дозволяє підвищити твердість матеріалу на 20-30% в порівнянні з традиційними методами зміцнення і в кілька разів збільшити їх зносостійкість.

Також до переваг даного методу можна віднести можливість зміцнення важкодоступних ділянок деталей шляхом введення променя лазера через вікна і отвори і можливість обробки без збільшення шорсткості, що створює

можливість виключити фінішну обробку.

В наш час найбільш широке застосування для обробки матеріалів отримали три типи лазерів:

1. твердотільні на ітрій-алюмінієвому гранаті;
2. твердотільні на склі;
3. молекулярні або газові на діоксиді вуглекислого газу .

Для детального аналізу впливу потужного лазерного випромінювання на поверхню металу потрібно мати чіткі уявлення про всі ті внутрішні процеси, що при цьому відбуваються. Тому розглянемо особливості формування мікроструктури у зоні лазерного впливу (ЗЛВ).

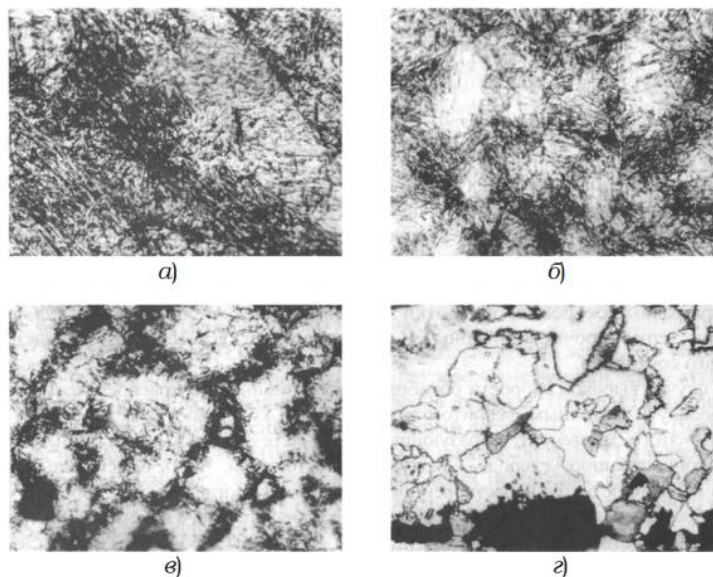


Рис. 1.9. Мікроструктура різних шарів сталі 45 (x400) ЗЛВ: а – зона оплавлення; б – верхня частина ЗТВ; в – середина ЗТВ; г – нижня частина ЗТВ.

У процесі лазерної обробки ступінь аустенізації визначається впливом максимальних температур, до яких нагріваються ті чи інші зони, швидкостями нагрівання і охолодження, а також часом перебування при температурах вище критичної точки. Оптимальний комплекс властивостей матеріалу у зонах оплавлення та верхній частині ЗТВ, отриманих після різкого нагріву, призводить до зміцнення за рахунок перетворення надлишкового фериту в

аустеніт та інтенсивного насичення колишніх феритних ділянок вуглецем. При цьому в процесі охолодження утворюється дрібнодисперсний мартенсит з рельєфними границями між пластинами. Мікротвердість зони оплавлення коливається в межах від 7000 до 8500 МПа, причому більш високі її значення спостерігаються в нижній частині зони, що можна пояснити більшою швидкістю охолодження. У нижній частині ЗТВ існує область, у якій поруч із мартенситом є сітки трооститу, трооститофериту та фериту. Мікротвердість мартенситу в області трооститної сітки $H_{50} = 7520$ МПа, а в області феритної – 6440 МПа. Це свідчить про меншу насиченість твердого розчину при аустенізації.[12]

Під час лазерного зміцнення деталей важливим фактором впливу на їх ресурс виробітку є глибина зміцненого шару, яка залежить від параметрів поверхневої лазерної обробки, нанесених на зміцнювану поверхню поглинаючих покриттів тощо.

Зменшення зношування деталей після лазерного гартування обумовлено рядом факторів: великою твердістю поверхні, високою дисперсністю структури, збільшеними несучими властивостями поверхні, зменшеним коефіцієнтом тертя, тощо.

1.2.3.2. Плазмова обробка

Одним із найбільш економічних, технологічних і перспективних джерел нагріву є – плазмовий струмінь. Щільність теплового потоку досягає 10^6 Вт/см², що дозволяє віднести плазмове зміцнення до висококонцентрованих джерел нагріву.

Метою плазмового поверхневого зміцнення колісних пар є підвищення їх довговічності і надійності при експлуатації без зниження працездатності рейок. В основі методу лежить здатність плазмової дуги створювати на невеликій ділянці поверхні високу щільність теплового потоку, якого достатньо для нагріву будь-якого металу. Нагрів металу відбувається за

рахунок вимушеного конвективного теплообміну.

Технологія плазмового поверхневого зміцнення дозволяє підвищити міцність металу. Інтенсивність зносу гребенів колісних пар з плазмовим зміцненням значно нижче, ніж у серійних (в 2,5 ... 3 рази).

Дана технологія має дві відмінні риси:

1) локальне (в зоні найбільшого зносу)поверхневе зміцнення гребня колеса на глибину 2,5 ... 3 мм і ширину 35 мм з твердості 280 НВ (в вихідному матеріалі) до 430 НВ в середньому. Це забезпечує оптимальне співвідношення твердості контактуючих поверхонь колеса і рейки;

2) зміна структури зміцненої зони колеса. Це покращує механічні властивості колеса. В тому числі знижує коефіцієнт тертя на 30-50% і підвищує стійкість до тріщин матеріалу колеса в зоні плазмового зміцнення.

В порівнянні з іншими методами, плазмова обробка має так переваги[13]:

- 1) висока щільність потоку енергії дозволяє досягнути високих швидкостей як нагріву, так і охолодження;
- 2) швидке виробництво (час зміцнення плазмою на 1-2 порядки нижчий в порівняння з термообробкою або ХТО);
- 3) відсутність шкідливих викидів, токсичних відходів;
- 4) ефективна для масивних виробів.

1.2.4. Поверхневе легування

1.2.4.1. Електроіскрове легування

Для підвищення надійності і нанесення захисних покриттів на колісні пари застосовують електроіскровий метод, який дозволяє проводити нарощування зношеного шару до 2,0 мм на діаметр деталі. Електроіскрове легування (ЕІЛ) виконується в газовому середовищі, де відбувається перенос і осідання матеріалу анода-інструмента на поверхню катода-деталі або

насичення (легування) поверхневого слою катода елементами, які входять в склад матеріалу анода.

Електроіскрове легування (ЕІЛ) металевих поверхонь засноване на явищі електричної ерозії і полярного перенесення матеріалу анода (інструменту) на катод (деталь) при протіканні імпульсних розрядів в газовому середовищі.

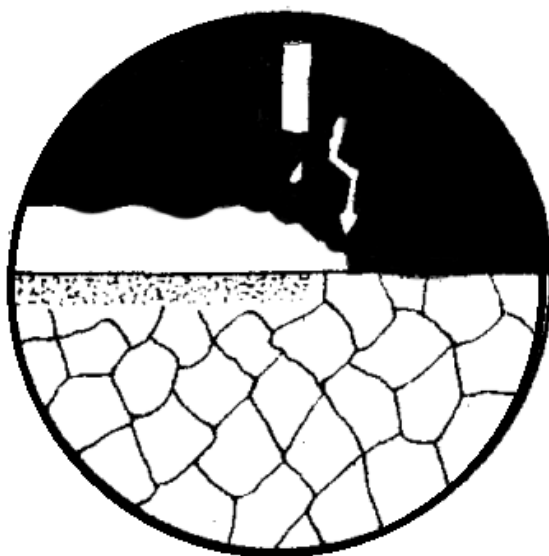


Рис. 1.10. Процес електроіскрового легування

Даним методом можна кардинально змінити механічні, термічні, електричні, термоємнісінні і інші робочі властивості поверхонь деталей. До головних особливостей електроіскрового методу можна віднести локальну обробку – легування можна виконувати тільки в суворо зазначених місцях радіусом від долі міліметра і більше, не захищаючи іншу поверхню деталі; високу міцність зчеплення нанесеного матеріалу з основою; відсутність нагріву деталі в процесі обробки; відсутність попередньої обробки поверхні деталі.

В даний час електроіскрове легування використовується для:

- збільшення твердості, корозійної стійкості, а також зносо- і жаростійкості;

- зниження здатності до схоплювання поверхонь при терті;
- відновлення розмірів інструменту;
- зміни електричних властивостей контактуючих елементів і емісійних здібностей поверхні;
- проведення на оброблюваній поверхні процесів для утворення на ній необхідних хімічних з'єднань;
- створення на робочій поверхні перехідних шарів з відповідною шорсткістю.

Не дивлячись на недоліки: малу товщину слою, який формується ($\leq 0.1-0.2$ мм), його високу шорсткість і пористість ; відносно низьку продуктивність обробки ($\leq 10-20$ *см²* /хв.); неможливість використання електропровідних матеріалів і т.д.

В наш час розрізняють два напрямки електроіскрового легування. Чистове – коли на катоді формується відносно тонкі ($\approx 0.01-0.12$ мм.) і якісні слої. І грубе, при якому товщина формуючого слою може досягати $0.15-0.2$ мм. і більше.[14]

1.2.4.2. Лазерне легування

З метою поліпшення поверхневих властивостей виробів проводять лазерне поверхнєве легування. Його здійснюють шляхом введення в задані ділянки поверхні різних компонентів, які, змішуючись з матеріалом основи, утворюють сплави або композиції необхідного складу. При цьому обов'язковою умовою є збереження в оброблених лазером ділянках поверхні значного матеріалу основи. Таким чином, принципова відмінність легування від гартування полягає в зміні хімічного складу поверхневого шару матеріалу. Схематичне зображення поперечного перерізу сталевих зразків після лазерного легування представлено на рис. 2.

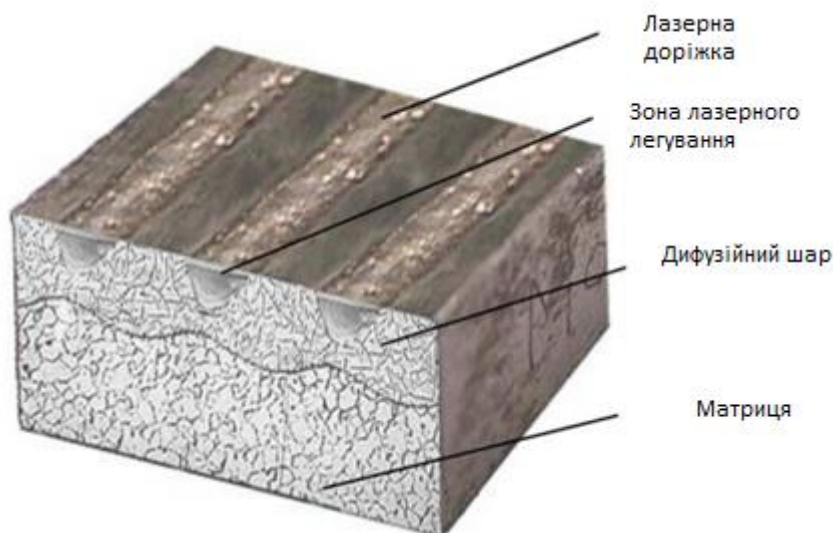


Рис. 1.11. Формування модифікованого слою на сталевій поверхні

Виходячи з цілей лазерного легування (підвищення зносостійкості, корозійної стійкості, контактної витривалості та інших службових характеристик), необхідно враховувати відомі результати робіт по ХТО. Разом з тим не можна відразу зіставляти процеси формування легованого поверхневого шару при опаленні лазером з процесами ХТО, при яких легування йде як дифузія у твердій фазі. При лазерному легуванні в результаті «жорсткого» термічного циклу з великими швидкостями нагрівання й охолодження характерне утворення перенасичених метастабільних структур високої дисперсності, що недосяжно при звичайній ХТО.

Розміри легової зони залежать в основному від енергетичних параметрів випромінювання та товщини покриття з легуючого матеріалу. Як

правило, легування імпульсним випромінюванням забезпечує менші розміри легової зони, ніж при обробці безперервним випромінюванням. Зокрема, якщо при імпульсній обробці глибина зони досягає 0,3-0,7 мм, то застосування безперервного випромінювання потужних лазерів дозволяє збільшити глибину зони до 3 мм.[7]

1.2.5. Комбінована електро-механічна обробка

Технологія ЕМО є комбінацією термічної та силової взаємодії, що

призводить до зміни фізико-механічних та якісних показників поверхневого шару (підвищення мікротвердості, зменшення шорсткості), дозволяє підвищити експлуатаційні властивості (зносостійкість, контактну міцність) в 1.5-3 рази.

Обробка відбувається за допомогою інструмента – роlikової головки, до якої підключено джерело живлення зі змінним струмом. За допомогою даної технології можна здійснювати зміцнення циліндричних та плоских поверхонь деталей машин виготовлених з середньо- та високовуглецевих, а також легированих сталей. Застосування змінного струму (від керованого джерела живлення) забезпечує велику глибину зміцнення (до 2 мм.), та високу мікротвердість зміцненого шару (до 1000 Hv), шорсткість поверхні в межах Ra 0,8...3,2 мкм. Тонка обробка циліндричних поверхонь відбувається, коли не потрібна велика глибина зміцнення (до 0,3 мм.), а необхідно значно зменшити шорсткість поверхні (для Ra в 4-10 раз).[15]

Висновки до розділу 1

1. Аналіз літератури показує, що характер взаємодії колеса та рейки визначається насамперед геометрією площадки контакту. При зменшенні розмірів контактної зони, спостерігається багатократне збільшення напружень.
2. В результаті специфіки взаємодії рейки та колеса, при переміщенні рухомого складу найбільшого зношування зазнають гребені коліс та бокові частини головки рейок.
3. Проведено аналіз літературних джерел та виділено найкращі методи підвищення фізико-механічних властивостей деталей. Для досягнення бажаного результату використовуються як процеси, що базуються на фізичних, хімічних, механічних методах обробки, так і ті, що полягають в нанесенні шару матеріалу з ізовсім іншим хімічним складом.
4. Проведений огляд дозволилив, обґрунтовано, з усіх розглянутих

методів підвищення якості поверхневих шарів виробів виділити, як найбільш перспективний, комплексний метод, який би включав в себе відомі згадані способи обробки, поєднуючи їх гідності, а в багатьох випадках перевершував би їх. Для подальшої роботи обрано комбінацію лазерного термічного зміцнення та ППД.

1.

РОЗДІЛ 2. Теоретичне обґрунтування режимів термодеформаційного зміцнення сталі М76

Базовим процесом при лазерному термічному зміцненні є термічна дія на матеріал. Інтенсивний лазерний потік поглинається приповерхневим шаром та провокує структурні зміни металу. Так як фізико-технічні властивості наряду залежать від його структури, має сенс звертати особливу увагу на закономірності формування структури при різних варіаціях умов та режимів лазерної обробки.

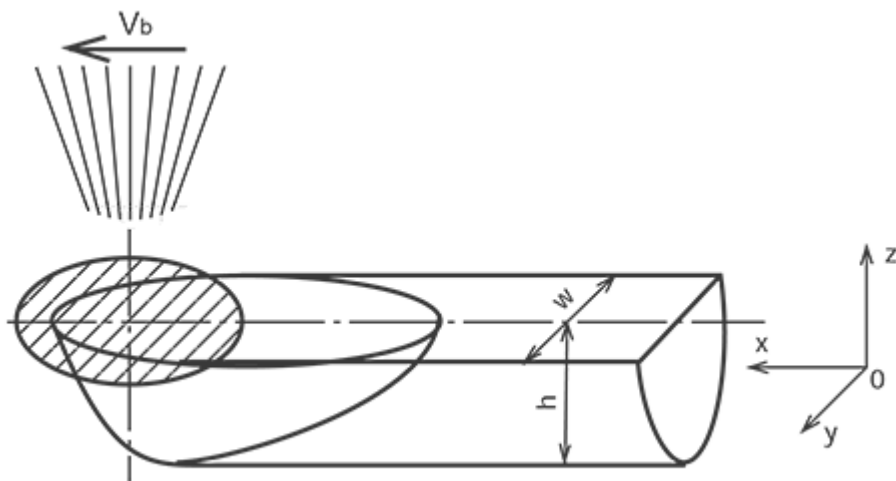


Рис. 2.1 Схема дії лазерного променя та геометрія ЗТВ

2.1. Теплофізична модель нагрівання

Для прогнозування температури після дії лазерного променя була використана теплофізична модель. [16]

В наслідок дії лазерного випромінювання в матеріалі виникає нестационарне температурне поле $T(\vec{r}, t)$. Для прогнозування впливу лазера на тіло потрібно використовувати моделі, базовані на процесах теплопровідності. Для представлення об'єму матеріалу в рамках моделі його розбивають на

нескінченно малі точки. В будь якому тілі з температурою $T(\vec{r}, t)$ можна відокремити поверхню, всі точки якої в певний момент часу t мають однакову температуру. Така поверхня є ізотермічною $T(\vec{r}, t_1) = \text{const}$, між двома нескінченно близько розташованими такими поверхнями з температурами T і $T + \Delta T$ (рис. 2.2), можна розглянути швидкість зміни температури в якійсь локальній точці в визначеному напрямку, що буде похідною функції T у напрямку \vec{l}

$$\frac{\partial T}{\partial l} = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \cos \alpha + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \cos \beta + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \cos \gamma$$

α, β, γ - напрямні кути вектора в декартовій системі координат.

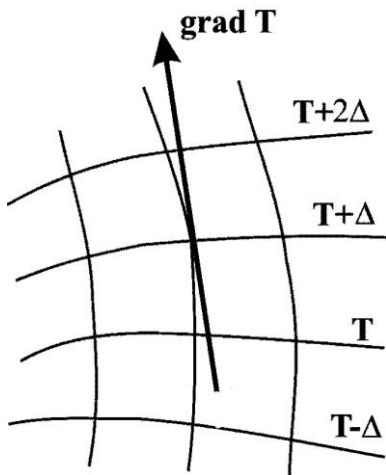


Рисунок 2.2 Візуалізація температурного градієнта і ізотермічної поверхні

Проаналізувавши, можна помітити, що швидкість зміни температури сягає свого максимуму в напрямку нормалі до ізотермічної поверхні, тому в кожній точці тіла можна побудувати такий вектор, спрямований до нормалі ізотермічної поверхні в бік зростання температури, що характеризуватиме швидкість зростання температури в даному напрямку. Такий вектор називають градієнтом температурного поля

$$\vec{\nabla} T = \text{grad } T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k}$$

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - одиничні вектори, що збігаються за напрямком з координатними осями відповідно.

$$|\nabla T| = |\text{grad} T| = \frac{\partial T}{\partial n}, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = \vec{n} |\text{grad} T|$$

Зв'язок між величинами, що визначають розподіл температури описує рівняння теплопровідності, виведене з закону збереження енергії та закону Фур'є. В разі нерухомого джерела тепла має вигляд:

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = \text{div}[-\kappa \text{grad} T] + q_v(\vec{r}, t)$$

Теплофізичні коефіцієнти c - питома теплоємність, ρ - щільність, κ - коефіцієнт теплопровідності в загальному випадку залежать від координат, часу і температури. Тепловий потік $-\kappa \text{grad} T$ вимірюється кількістю теплоти, що проходить в одиницю часу через одиницю площі поверхні, перпендикулярної напрямку потоку в розглянутій точці. Щільність потужності теплового джерела $q_v(\vec{r}, t)$, чинного в обсязі тіла, в загальному випадку також залежить від температури.

Особливістю дії лазерного променя є те, що випромінювання проникає в глибину матеріалу, і теплове джерело знаходиться не на поверхні напівнескінченного тіла, а є об'ємним і знаходиться на глибині.

Для розгляду опромінювання лазерним пучком вдаються до наступних наближень:

Матеріал вважають ізотропним та гомогенним, його теплофізичні властивості однакові в усіх точках та всіх напрямках, та залежністю оптичних та теплофізичних характеристик від температури можна знехтувати.

Теплове джерело розподілене в об'ємі середовище та не залежить від температури.

У цьому випадку, так як $\text{div}(\text{grad} T) = \Delta T$ (Δ - оператор Лапласа) можна

отримати наступне рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = a \Delta T(\vec{r}, t) + \frac{1}{\rho c} q_v(\vec{r}, t)$$

де $a = \kappa / \rho c$ - коефіцієнт температуропровідності

При розгляді лазерних теплових джерел за вихідний параметр випромінювання беруть густину потужності.

При нагріванні твердих тіл лазерним випромінюванням розподіл густини потужності світлового потоку в поглинаючій середовищі за глибиною описується законом Бугера - Ламберта , в диференціальному вигляді

$$\frac{dq(z)}{dz} = -\alpha q(z)$$

У діапазоні довжин хвиль від дальньої ІЧ-області до ближньої УФ для більшості металів характерний великий коефіцієнт поглинання, який можна вважати незмінним ($\alpha = const$). У цьому випадку зміна щільності світлового потоку по глибині описується інтегральним законом Бугера-Ламберта.

$$q(z) = A q_0 \exp(-\alpha z)$$

Де q_0 - щільність падаючого світлового потоку на поверхню матеріал, A - поглинальна здатність .

У матеріалі з малою теплопровідністю κ при певній щільності потоку $q_0(x, y)$ рівноважна температура завжди вище , ніж в речовині з великим значенням теплопровідності. Здатність матеріалу накопичувати тепло до досягнення рівноважного стану характеризується питомою теплоємністю. Коефіцієнт температуропровідності $a = \kappa / \rho c$ визначає, швидкість встановлення теплового рівноваги в матеріалі при миттєвій дії теплового джерела . При цьому відстань, на яку тепла хвиля поширюється в матеріалі за час t , може бути оцінено як $l_T \approx \sqrt{at}$. Розмір прогрітої області матеріалу зростає за рахунок температуропровідності пропорційно цьому параметру.

Для вирішення задачі теплопровідності, наведеної раніше, потрібно задати конкретні умови, що однозначно характеризують завдання, для цього вводять умови однозначності:

1) геометричні умови, що характеризують форму і розміри тіла , в якому протікає процес теплообміну ;

2) умови, що визначають фізичні та теплофізичні властивості тіла (тепло - і температуропровідність , теплоємність , щільність) , а також закон розподілу об'ємних джерел теплоти $q_v(\vec{r}, t)$;

3) граничні умови , що характеризують особливості теплового взаємодії граничної поверхні тіла з навколишнім середовищем. Зокрема , необхідно знати , яким чином відбуваються втрати тепла з поверхні : або за допомогою випромінювання (за законом Стефана-Больцмана) , конвекції (за законом Ньютона) або випаровування ;

4) тимчасові або початкові умови , що визначають розподіл температури в будь-якій частині тіла в деякий момент часу , який для конкретної фізичної задачі задається або приймається за нульовий $t = 0$.

Для вирішення задачі опромінення лазером використано тривимірне рівняння теплопровідності[29]:

$$c\rho \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(\lambda \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\lambda \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(\lambda \frac{\delta T}{\delta z} \right)$$

Граничні умови:

$$T = T(x, y, z, t)$$

$$T(x, y, z, 0) = T_H$$

На поверхні, що оброблюється

$$\lambda \frac{\delta T(x, y, 0, t)}{\delta z} + q(x, y, z) = 0$$

За межами зони випромінювання

$$\delta T(x, y, 0, t) \delta z + \alpha T(x, y, 0, t) - T_c = 0$$

Граничні умови на інших межах розрахункової області моделюють теплообмін з оточуючим середовищем:

$$\lambda \frac{\delta T(x, y, L_z, t)}{\delta z} + \alpha(T(x, y, L_z, t) - T_c) = 0$$

$$\lambda \frac{\delta T(0, y, z, t)}{\delta z} + \alpha(T(0, y, z, t) - T_c) = 0$$

$$\lambda \frac{\delta T(x, L_y, z, t)}{\delta z} + \alpha(T(x, y, L_y, t) - T_c) = 0$$

$$\lambda \frac{\delta T(x, 0, z, t)}{\delta z} + \alpha(T(x, 0, z, t) - T_c) = 0$$

$$\lambda \frac{\delta T(L_x, y, z, t)}{\delta z} + \alpha(T(L_x, y, z, t) - T_c) = 0$$

де, x, y, z – просторові координати, t – час, c – коефіцієнт теплоємності матеріалу деталі, ρ – густина матеріалу, λ – коефіцієнт теплопровідності, q – густина потужності випромінювання, α – коефіцієнт тепловіддачі, T_n , T_c – початкова температура деталі та навколишнього середовища

2.2. Фізико-хімічний аналіз

Для отримання бажаної мартенситної структури сталі необхідно нагріти метал до температур аустенітного перетворення з подальшим швидкісним охолодженням. Визначення значимих температур аустенізації, початку і кінця

мартенситного перетворення сталі М76 здійснюється при аналізі трикомпонентної фазової діаграми залізо-вуглець-марганець

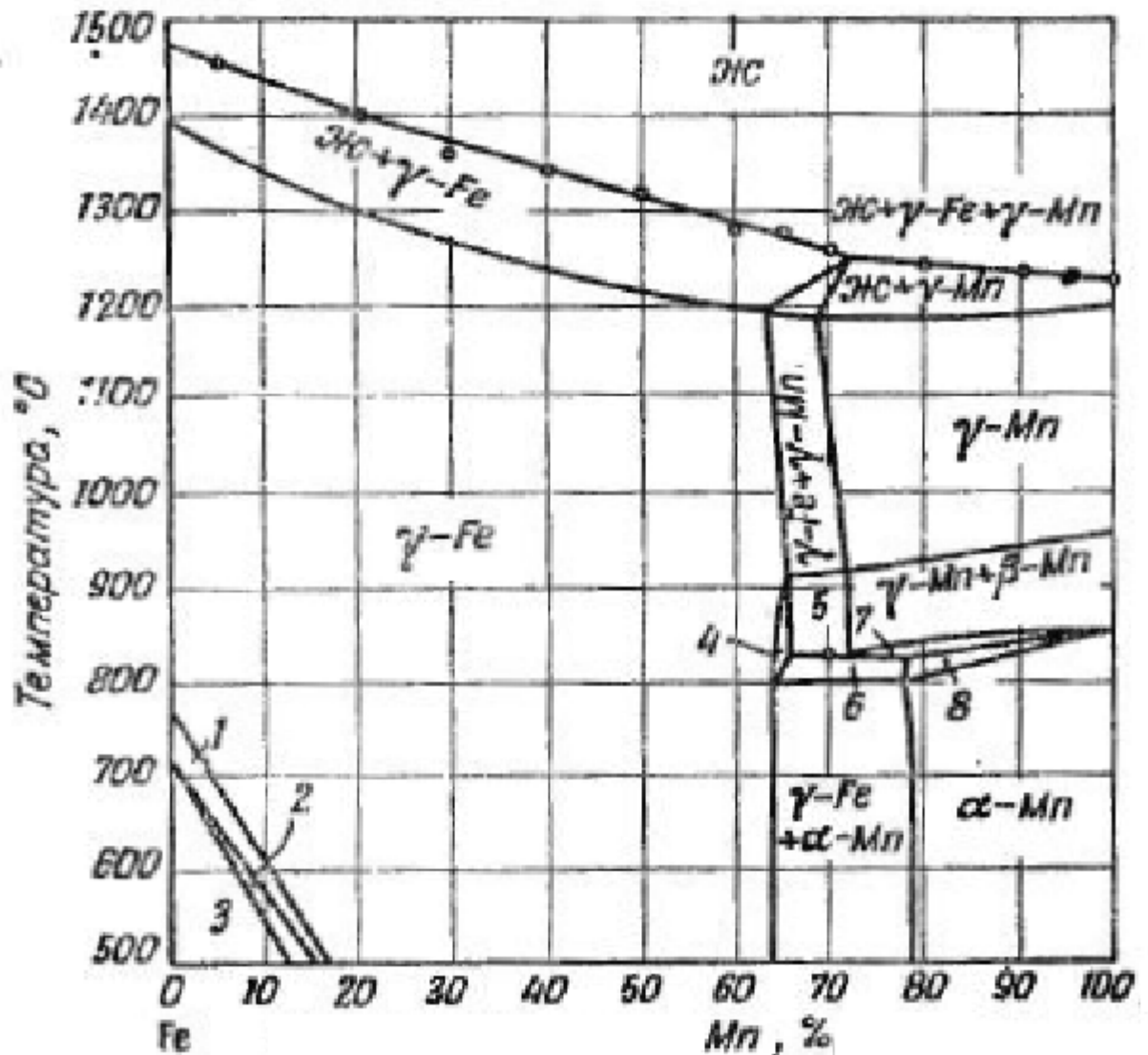


Рис 2.3. Переріз рівноважної діаграми системи марганець-вуглець-залізо при 1% С [17] 1 – γ -Fe + α -Fe; 2 - γ -Fe + α -Fe + Fe_3C ; 3 - α -Fe + Fe_3C ; 4 - γ -Fe + β -Mn; 5 - γ -Fe + γ -Mn + β -Mn; 6 - γ -Fe + α -Mn + β -Mn; 7 - α -Mn + β -Mn + γ -Mn; 8 - α -Mn + β -Mn

Аналізуючи діаграму марганець-вуглець-залізо, можна побачити, що при вмісті марганцю менше 1% має місце трьохфазна область 2, що містить ферит, аустеніт та карбід Fe_3C , при вищих значеннях вмісту марганцю спостерігається значне падіння температури ферито-аустенітного перетворення. Для більш точного визначення температур фазових перетворень доцільно використати

термокінетичну модель. [18]

Для досягнення аустенітної структури даної сталі, її потрібно нагріти до 1100-1300°C. Критичні температури фазових перетворень сталей, розраховуються за формулами:

$$A_{Cm} = 244.4 + 992.4C - 465.1C^2 + 46.7Cr + 19CCr - 6.1Cr^2 + 7.6Mn + 10Mo - 6.8CrMo - 6.9Ni + 3.7CrNi - 2.7CrNi + 0.8Ni^2 + 16.7SiMn, \quad (1)$$

$$A_{r3} = 910 - 310C - 80Mn - 20Cu - 15Cr - 55Ni - 80Mo + 0.35(h - 8), \quad (2)$$

$$M_n = 561 + 474C - 33Mn - 17.7Ni - 12.1Cr - 7.5Mo + 10Co - 705Si, \quad (3)$$

де A_{Cm} (для доєвтектоїдних сталей A_{C3}), A_{r3} , M_n – критичні точки температур структурно-фазових перетворень сталі, °C; C, Mn, Cr, Si, ... – хімічний склад матеріалу, %, h – товщина зразка, мм.

Згідно рівнянь (1-3), розраховані критичні точки температур структурно-фазових перетворень для сталі M76 ($A_1=727^\circ\text{C}$, $A_{C3}=810^\circ\text{C}$, $A_{r3}=700^\circ\text{C}$, $M_n=210^\circ\text{C}$).

Необхідна глибина зміцненої зони може бути визначена з використанням теорії Герца для стаціонарного навантаження

$$\sigma_z = \frac{\sigma_{\max}}{(1 + \frac{z}{a})^2} \quad (4)$$

$$\text{де } a = 0.698 \cdot R_z \cdot \sqrt[3]{Q_{cp} \cdot \frac{\alpha}{E}}, \quad E = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}; \quad \sigma_{\max} = 0.978 \sqrt[3]{Q_{cp} \cdot E^2 \cdot \alpha};$$

де E – приведений модуль пружності; Q_{cp} – навантаження на пару тертя; σ_{\max} – максимальна напруга в зоні контакту; a – радіус кругової площини контакту; z – глибина зміцнення; R_z – шорсткість поверхні.

Параметрами, що визначають характеристики матеріалу після поверхнево-пластичного деформування є частота обертів робочого інструменту v та подача при обробці S . В експериментах використано попередньо визначені

[19] режими.

Висновки до розділу 2

1. Попереднє визначення оптимальної температури лазерної обробки проводилося при використанні трикомпонентної діаграми залізо-вуглець-марганець, більш точних значень критичних точок досягнуто з використанням термодинамічної моделі.
2. Для ППД доцільно використати режими, результативність яких успішно продемонстрована в роботі[19].

РОЗДІЛ 3. Методика проведення експериментальних досліджень

Дослідження проводилося на зразках зі сталі М76 – найрозповсюдженішої залізничної сталі. Сталь виготовляють мартенівським, конвертерним або електропічним способом, межа міцності на розтяг $\sigma_B = 970$ МПа, твердість НВ 281.

Таблиця 3.1 Хімічний склад сталі М76 [20]

C	S	P	Mn	Si	Fe
0.71-0.84	≤ 0.045	≤ 0.035	0.75-1.25	0.18-0.55	Залишок

Згідно до прийнятих норм можемо судити про структуру сталі. Так як вміст вуглецю коливається від 0,71% до 0,84% матеріал може мати структуру як доєвтектоїдної так заєвтектоїдної, так і мати рівновісну перлітну структуру

1.1. Методика та режими лазерного термодеформаційного зміцнення

Дія лазерного випромінювання на сталь М76 була розглянута на експериментах з використанням волоконного лазера та більш сучасного діодного лазера[21].

Для проведення експерименту використано волоконний лазер ROFIN-SINAR FL010 з довжиною хвилі випромінювання 1,06 мкм



Рис. 3.1 Волоконний лазер ROFIN-SINAR FL010

Обладнання дозволяє працювати як в безперервному, так і в імпульсному режимі. Накачка відбувається діодними лазерами, та продукує випромінювання до 1000 Вт. В залежності від вибору лінзи можна отримувати промені з різними показниками якості – від 2,5 до 30 мм*мрад.

При проведенні експерименту, опираючись на теоретичні значення проводилося нагрівання зразків до 1200 °С, контроль температури на поверхні зразка здійснювався двоколірним пірометром та спеціальним програмним забезпеченням [29]. Обробка реалізована 2D сканатором з швидкістю сканування 1000 мм/с, ширина ділянки що сканувалася – 10 мм, діаметр плями – 1,2 мм.

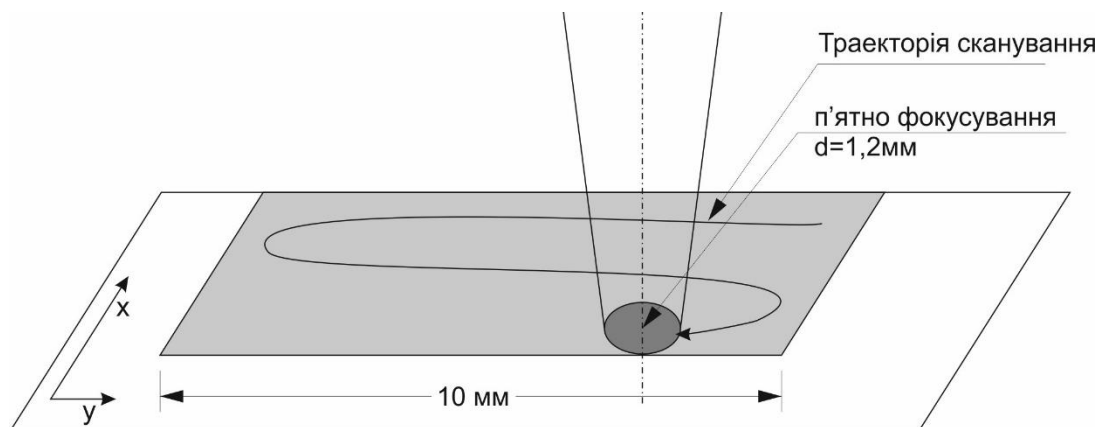


Рис. 3.3. Схема обробки скануючим лазерним променем.

Режим було підібрано згідно рекомендацій[22], та наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Режими обробки лазерним променем

№ експерименту	Швидкість обробки, мм/хв	Температура нагрівання зразка °С	Діаметр плями, мм
1	40	1200	1,2
2	90		
3	140		

Комбіноване зміцнення може відбуватися як суміжно, так і роздільно. Поверхнево-пластичне деформування проводилося з використанням вертикально-фрезерного верстату DYNA MUTE 2800 з ЧПК.



Рис. 3.3. Загальний вигляд верстату DYNA MYTE 2800

Обладнання дозволяє плавно регулювати частоту обертів шпинделя до 8000 об/хв, має 3-ох координатний стіл та можливість примусового охолодження деталі. В якості інструмента був використаний наконечник з кубічного нітриду бору. Даний матеріал дозволяє обробляти високоміцні $HRC > 60$ матеріали на високій швидкості.

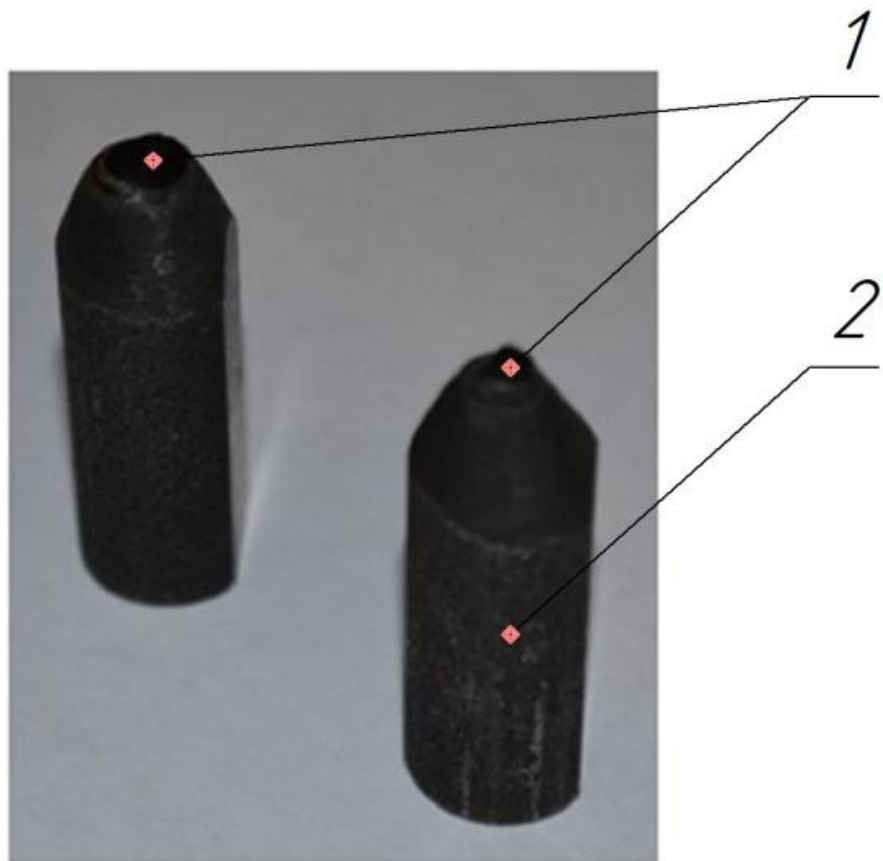


Рис. 3.4. Наконечники із кубічного нітриду бора (1), стержень (2) із сталі 45

Обробка відбувалася вздовж, попередньо зміцнених лазером, доріжок при різних подачах[19].

Таблиця 3.3. Режими при обробці на вертикально-фрезерному верстаті
DYNA MYTE 2800

Подача, мм/хв	Глибина, мм	Частота обертів шпинделя, об/хв
60	0,1	840
120		
300		

Обробка відбувається під контролем системи числового програмного

керування Mach3.

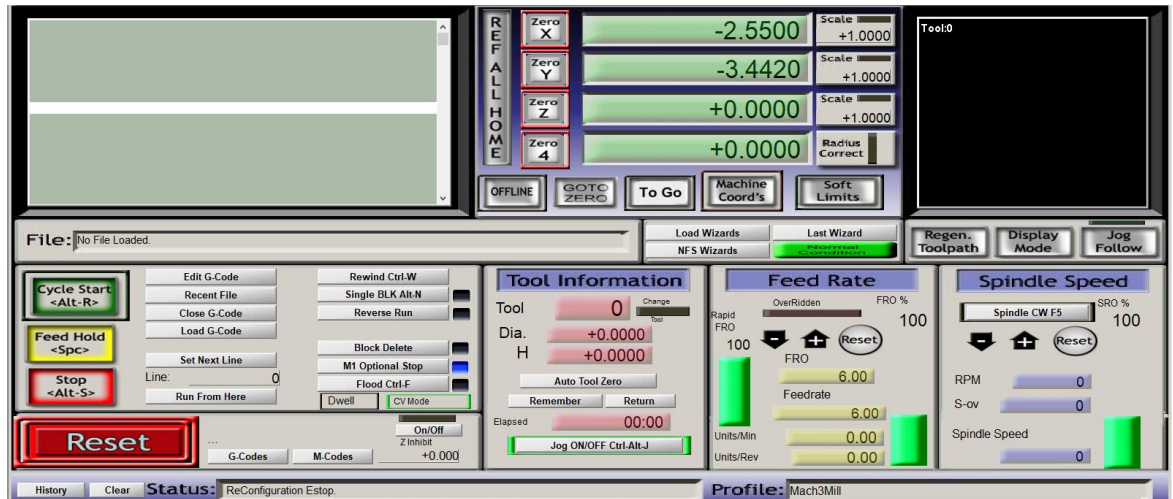


Рис. 3.5. Робоче вікно програми ЧПК.

Для обробки ділянок на потрібних режимах були створені програми для обробки з подачею 60 мм/хв:

N1 G94 G21 G17 F60 S840

N2 G1 X10 Y10 Z5

N3 G1 X10 Y10 Z-0.1

N4 G1 X60 Y10 Z-0.1

N5 G1 X60 Y10 Z5

N6 X0 Y0 Z5

N7 M30

Для обробки з подачею 120 мм/хв:

N1 G94 G21 G17 F120 S840

N2 G1 X10 Y10 Z5

N3 G1 X10 Y10 Z-0.1

N4 G1 X60 Y10 Z-0.1

N5 G1 X60 Y10 Z5

N6 X0 Y0 Z5

N7 M30

Для обробки з подачею 300 мм/хв:

N1 G94 G21 G17 F300 S840

N2 G1 X10 Y10 Z5

N3 G1 X10 Y10 Z-0.1

N4 G1 X60 Y10 Z-0.1

N5 G1 X60 Y10 Z5

N6 X0 Y0 Z5

N7 M30

Для вивчення структури матеріалу, що піддався лазерній дії та комбінованій лазерно-деформаційній дії проводилися дослідження на шліфах виготовлених в площині, перпендикулярній напрямку обробки. Зразки виготовляються відрізним кругом з постійним охолодженням, щоб уникнути перегріву, що призведе до відпуску, а як наслідок – зміни структури сталі та її фізико-технічних властивостей. Підготовка шліфів до дослідження проводиться згідно загальноприйнятих рекомендацій[23].

1.2. Методика вимірювання мікротвердості

При роботі пари колесо-рейка знос контактуючих деталей відбувається, здебільшого, за рахунок абразивного зносу, що виникає в наслідок контакту дрібних частинок – пилу, продуктів зносу і тд. Найбільш точним дослідженням будуть випробовування в умовах реального контакту колеса та рейки, та цей спосіб є найбільш трудомістким, деталі мають піддатися численним циклам дослідження при високих навантаженнях, а також монтаж та демонтаж деталі, що піддається випробовуванню. Зважаючи на те, що бічна поверхня рейки (що піддається найбільшому зносу) працює в умовах ковзання по абразиву,

спостерігається неперервність та лінійність залежності зносостійкості від твердості і в крихкій і в'язкій області руйнування [24]. Тому можна судити про зміну стійкості до абразивного зносу деталей можна судити з різниці між вихідною мікротвердістю матеріалу та з твердістю загартованої ділянки.

Аналіз мікротвердості зміцнених зразків на підготовлених шліфах проводився за допомогою лабораторного обладнання. Мікротвердість вимірювалася за допомогою твердоміра ПМТ-3.



Рис 3.6. Твердомір ПМТ-3

Обладнання призначене для оцінки структури матеріалів по мікротвердості методом вдавлювання алмазних наконечників (Віккерса, Кнуппа, Берковича). Точність вимірювання обладнання в ручному режимі складає 2%.

Для дослідження зразків зі сталі М76 використовувався алмазний наконечник Віккерса з квадратною основою та кутом при вершині в 136 градусів навантаження на індентор сягало 50 Н. Про величину мікротвердості можна судити з площі відтиску індентора на зразку.

Дослідження проводилося як на поверхні деталі, так і по глибині на

площині, перпендикулярній напрямку обробки. Виміри мікротвердості проводилися кожні 20мкм, для отримання кривої залежності мікротвердості від глибини, та, як результат отримання розмірів зміцненої ділянки.

1.3. Методика вимірювання шорсткості

Згідно до досліджень [25], шорсткість, як і мікротвердість поверхневого шару дуже сильно впливає на зносостійкість деталей в системі колесо-рейка, тому експеримент мав на меті отримання зразків не тільки з високими фізико-технічними властивостями, а й з найкращою якістю поверхні. Оскільки шорсткість є розмірною характеристикою, яка визначає геометрію поверхні, то оцінка параметрів проводилася відповідно стандартів.

Для оцінки якості поверхонь було обрано метод визначення шорсткості поверхні за її профілем, використовуючи графічне зображення контуру реального профілю – профілограму.

Даний метод реалізувався за допомогою профілографа - профілометра моделі «Калибр», схема якого наведена на рис. 3.7.

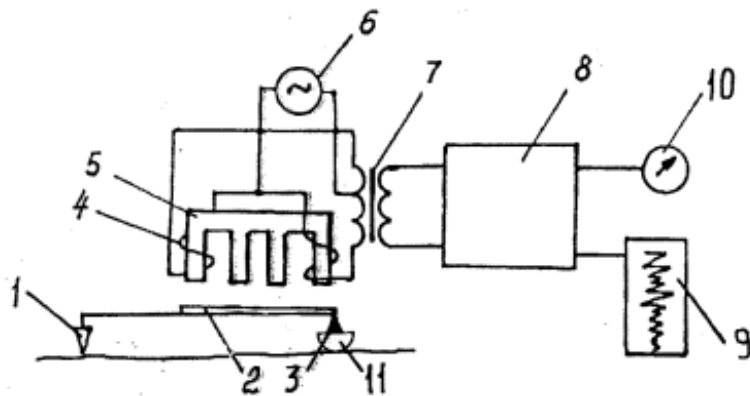


Рис. 3.7. Схема профілографа - профілометра «Калибр - 252».

1-алмазна голка; 2.-якорь; 3-призма; 4-індуктивні котушки; 5-осердя;
6-генератор звукової частоти; 7-трансформатор; 8-електронний блок;
9-самопис; 10-реєструючий прилад; 11-опора

Метод полягає в тому, що по поверхні деталі переміщується датчик, робочим елементом якого є алмазна голка 1 малим радіусом закруглення 2-10

мкм. Голка з'єднана з якорем 2 і може разом з ним повертатися відносно призми 3, змінюючи при цьому зазори між якорем 2 і осердям 5. Коливання голки 1 у вертикальному напрямку повторюють нерівності профілю поверхні і передаються якорю 2. Зміна повітряних зазорів між якорем 2 і осердям 5 спричиняє зміну змінного струму у котушках 4, що призводить до зміни напруги на виході диференційного трансформатора 7. Ці зміни напруги посилюються електронним блоком 8, на виході якого підключений записуючий прилад 9, який вимальовує на діаграмній стрічці профілограму, або поступають у інтегруючий пристрій, який безпосередньо реєструє значення параметрів; шорсткості у вигляді показів приладу 10. Призма 3 закріплена нерухомо відносно кульової опори 11, і оскільки куля має великий радіус кривизни, то вона ковзає по вершинам мікровиступів, піднімаючись і опускаючись відповідно до хвилястості поверхні. Завдяки цьому можливо записувати шорсткість поверхні, усунувши вплив хвилястості. Якщо кульова опора буде пересуватись по спеціально виготовленій дуже гладкій поверхні, то голка запише одночасно як шорсткість, так і хвилястість поверхні, яка досліджується.

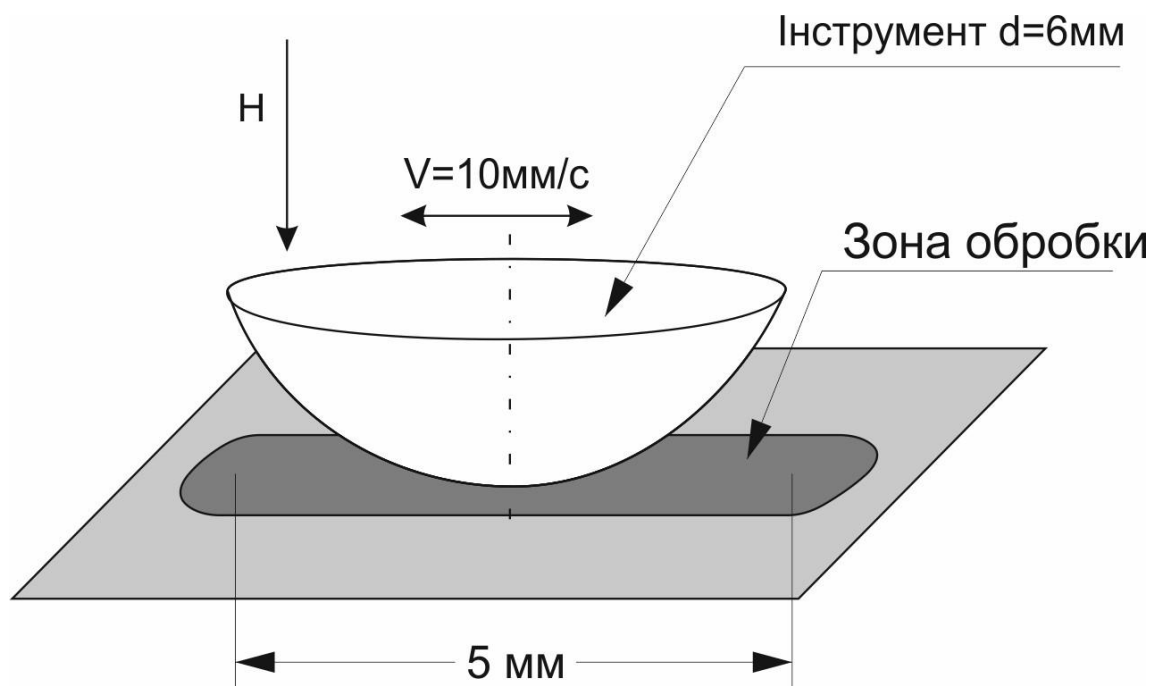
1.4. Методика вимірювання зносостійкості

Для вимірювання зносостійкості було проведено на 3-ох зразках: зразку з вихідною (необробленою) структурою, зразку після термічного зміцнення та зразку після комбінованого лазерного термодформаційного зміцнення. Для вимірювання зносостійкості було обрано зразки з найкращими показниками шорсткості R_a .

В якості інструмента був використаний шар діаметром 6 мм з оксиду алюмінію Al_2O_3 , на який прикладене зусилля в 5Н. Відбувалося ковзання кулі по поверхні матеріалу. Для всіх зразків довжина ковзання була установлена на позначці 5 мм, швидкість ковзання на 10 мм/с, при 10000 проходів загальна довжина ковзання складала 50 м. Умови експерименту наведені в таблиці.

Таблиця 3.4. Умови експерименту на зносостійкість

Навантаження	5 Н
Хід ковзання	5 мм
Кількість проходів	10 000
Загальна довжина	50 000 мм
Інструмент	Куля з Al ₂ O ₃ діаметром 6мм
Швидкість ковзання	10 мм/с



□

Рис. 3.8. Схема проведення експерименту на зносостійкість.

Величина зносу деталі визначається як різниця маси до випробовування і після і може бути переведена в об'ємні втрати за формулою:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

де V – об'єм втраченого матеріалу

m – маса втраченого матеріалу

ρ – густина матеріалу

Висновки до розділу 3

1. В якості матеріалу для досліджень обрано зразок зі сталі M76. Обробка здійснюється з використанням волоконного лазера ROFIN-SINAR FL010. Лазер працює в безперервному режимі, діаметр п'ятна фокусування 1,2 мм, сканування проходить на полосі шириною 10 мм при фіксованій температурі зі змінними швидкостями обробки. Подальша обробка здійснюється на вертикально-фрезерному верстаті DYNA MUTE 2800 з ЧПК, інструментом слугує накінецьник з КНБ, деформування проходить при різних подачах.
2. Оптимальні режими підбирається виходячи з значень мікротвердості та якості поверхні, як визначальних параметрів, що впливають на параметри зносостійкості.

РОЗДІЛ 4. Результати експериментальних досліджень та їх обговорення

4.1 Металографічне дослідження зразків після комбінованого зміцнення

Спосіб лазерного зміцнення сталей заключається в локальному нагріву поверхні високопотужним лазерним променем, та в швидкому його охолодженні за рахунок природніх процесів теплопровідності. Для досягнення бажаного результату (мартенситної структури сталі), швидкість має перевищувати критичну, що для більшості сталей сягає значень 50-200° C/с. За рахунок дії лазерного променя можливе досягнення на порядок вищих значень швидкостей нагріву та охолодження - $10^4 \dots 10^6$ °C/с.

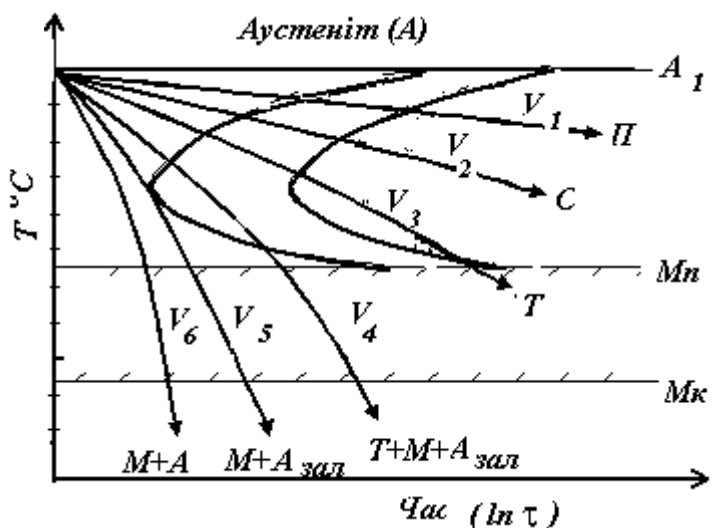


Рис 4.1 Залежність структури сталей від швидкості охолодження

Найвищих швидкостей охолодження можна досягнути при використанні імпульсного режиму випромінювання, при використанні лазера безперервної дії відбувається підтримання температури в результаті механізмів теплопереносу в середині металу

Особливості структури та мікротвердість після лазерного зміцнення було розглянуто на прикладі найрозповсюдженішої сталі в залізничній

інфраструктурі — М76.

Оптимальні режими, що забезпечують найбільшу міцність без оплавлення поверхні металу були визначені в процесі розрахунків, та коректовані в процесі експерименту. На мікрошліфах, виготовлених в перерізі, перпендикулярному напрямку обробки виконано заміри твердості по Віккерсу та металографічні дослідження на оптичному мікроскопі.

Результатом дії лазерного променя на матеріал є загартована приповерхнева зона глибиною від 300 до 330 мкм. На рисунку 4.2 помітно, що глибина зміцнення падає зі збільшенням швидкості обробки, це зумовлене зменшенням часу дії лазерного джерела тепла на матеріал. Значно вищих значень глибини можна досягнути при збільшенні кількості витої теплової енергії за одиницю часу, та це призведе до оплавлення поверхні, що є категорично небажаним для деталей, що розглядаються.

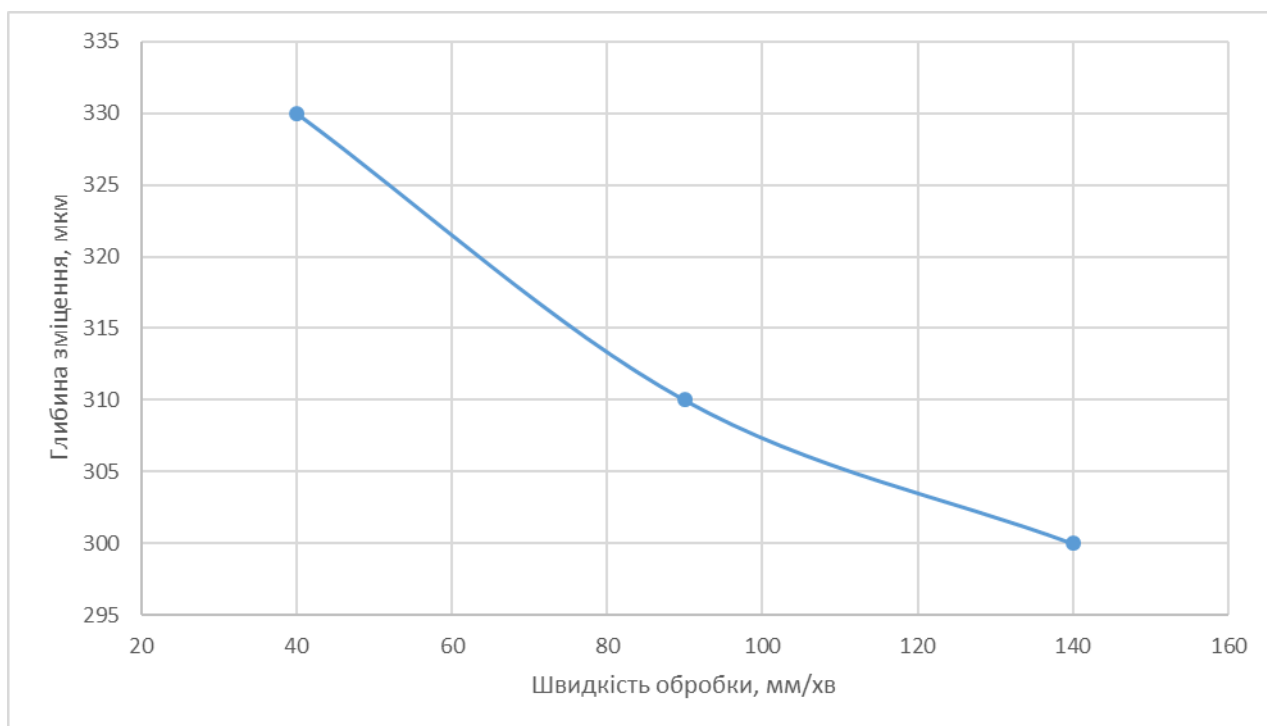


Рис. 4.2. Вплив швидкості лазерної обробки на глибину зміцнення приповерхневого шару сталі М76 при температурі нагрівання $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Мікроструктура зразків зі сталі М76 представлена на рисунку 4.3 При швидкісному охолод сталей евтектоїдного класу має місце перетворення пластинчатого перліту (рис а), на дрібнодисперсний пластинчастий мартенсит

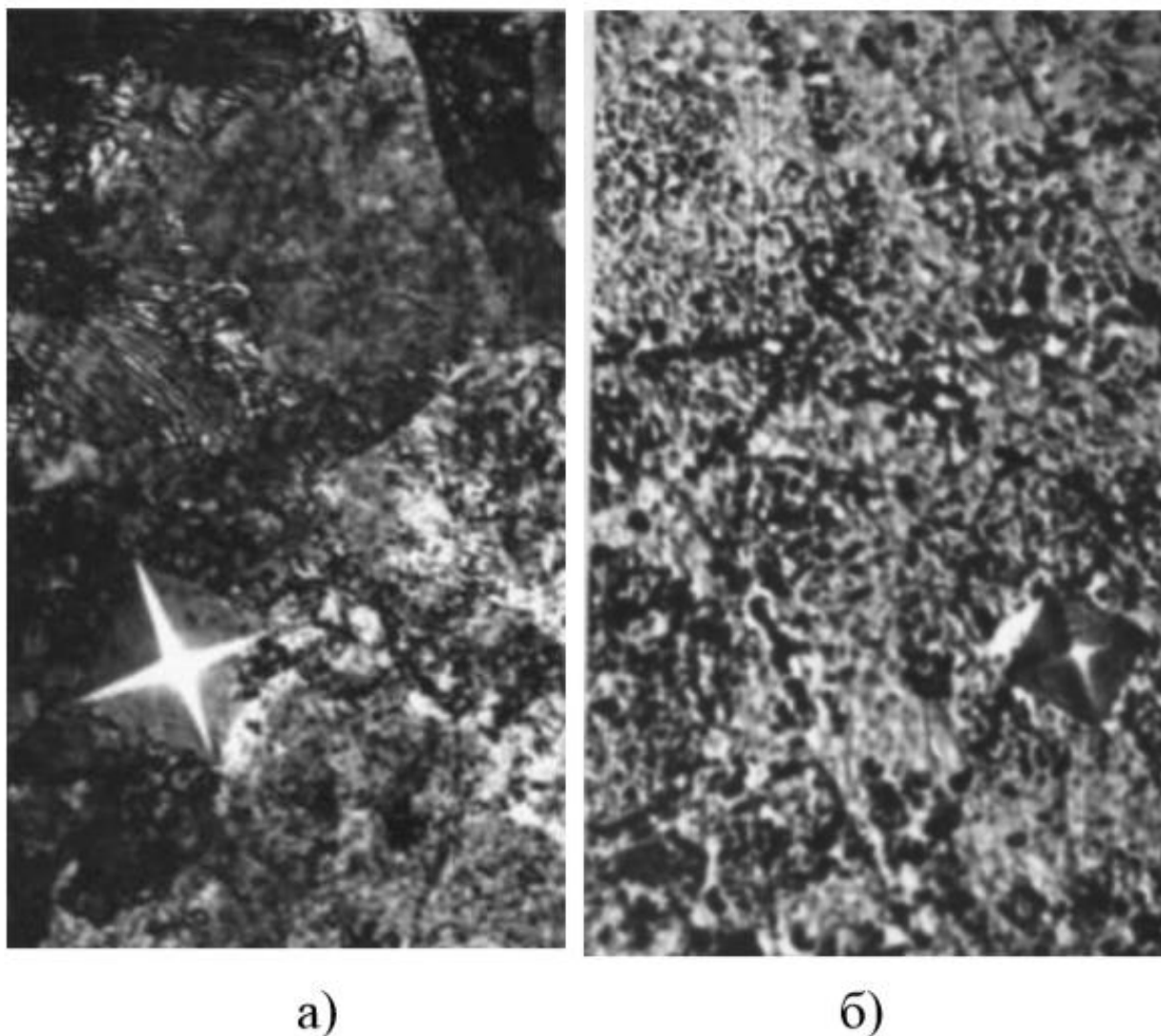


Рис. 4.3. Мікроструктура сталі М76: вихідний стан (а), та після термічного зміцнення (б). x1000 [26]

Висока швидкість охолодження при лазерній обробці призводить до структур, схожих з структурами, що утворюються при звичайній закалці, але зі значно вищими параметрами дисперсності, щільності дислокацій та ступеня тетрагональності мартенситу. Розмір зерна мартенситу та його твердість напряму залежать від значення швидкості охолодження, що підтверджує наступний рисунок.

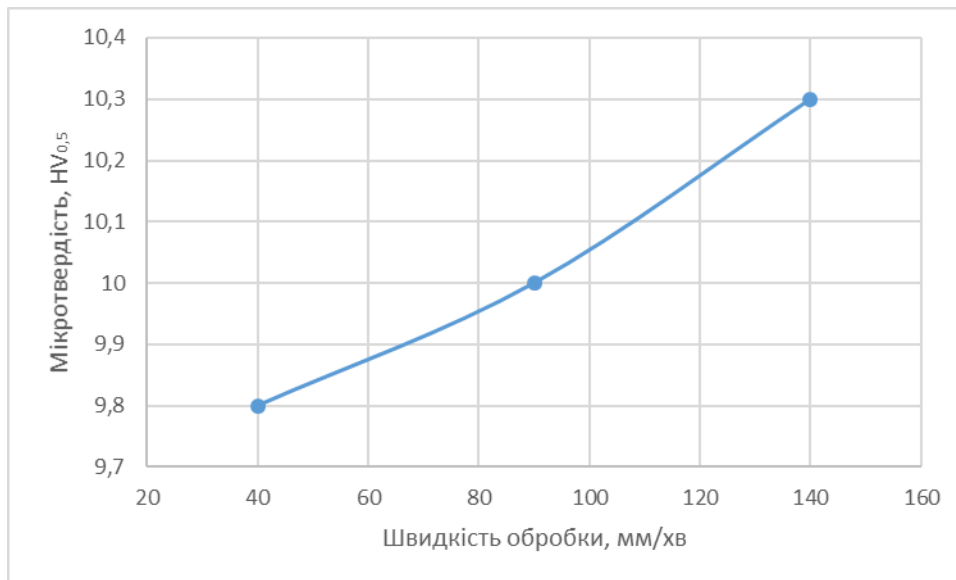


Рис. 4.4. Вплив швидкості лазерної обробки на мікротвердість приповерхневого шару сталі М76 при температурі нагрівання $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Як і очікувалося мікротвердість зразків зростає зі збільшеннями швидкості обробки. Така залежність може бути пояснена зменшенням часу, який проходить між початком та кінцем мартенситного перетворення.

Залежність мікротвердості від глибини зразка представлена на рисунку:



Рис. 4.4. Розподіл мікротвердості по глибині після лазерної обробки сталі М76 при температурі нагрівання $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ та швидкості обробки $V = 90\text{ мм/хв}$.

Помітно, що мікротвердість майже не відрізняється на всій глибині в зоні

термічного впливу, падіння значення мікротвердості помітне лише в перехідній зоні. Це пояснюється тим, що при нагріванні до температур, близьких до температури плавлення відбувається розчинення карбідів та додаткове легування твердого розчину вуглецем і марганцем. Малий час витримки попереджує ріст аустенітного зерна, тому структура загартованого шару є однорідною.

Подібний експеримент[27] показує вплив температури нагрівання зразків на розподіл мікротвердості по поверхні (рис. 4.5.) та по глибині зміцненого шару (рис. 4.6.).

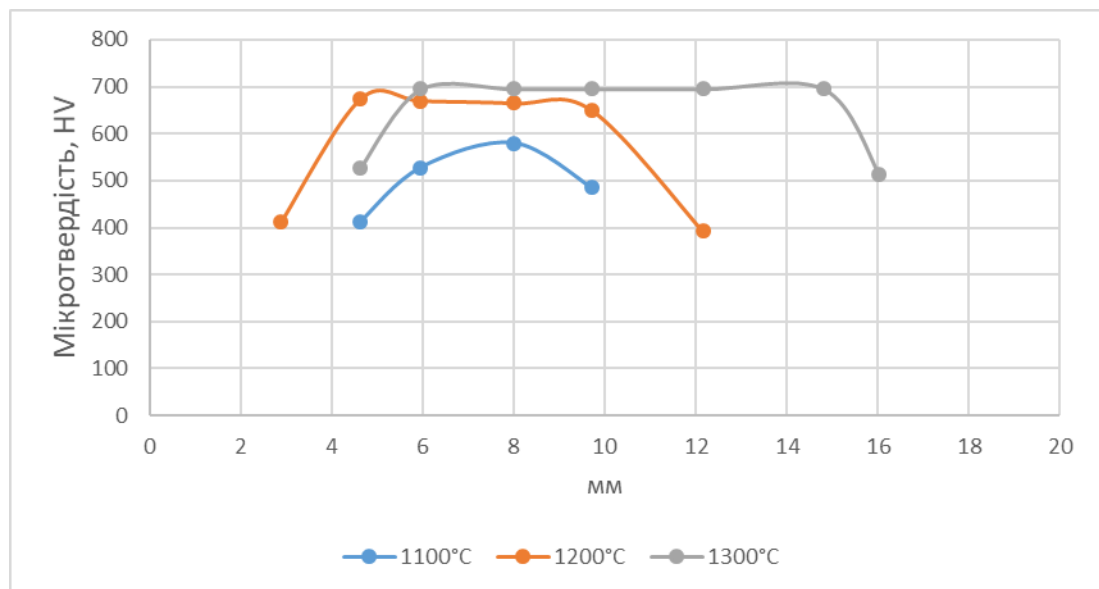


Рис. 4.5. Зміна мікротвердості на поверхні матеріалу при різних температурах нагрівання, при 6 мм/с та 1750 Вт[27]

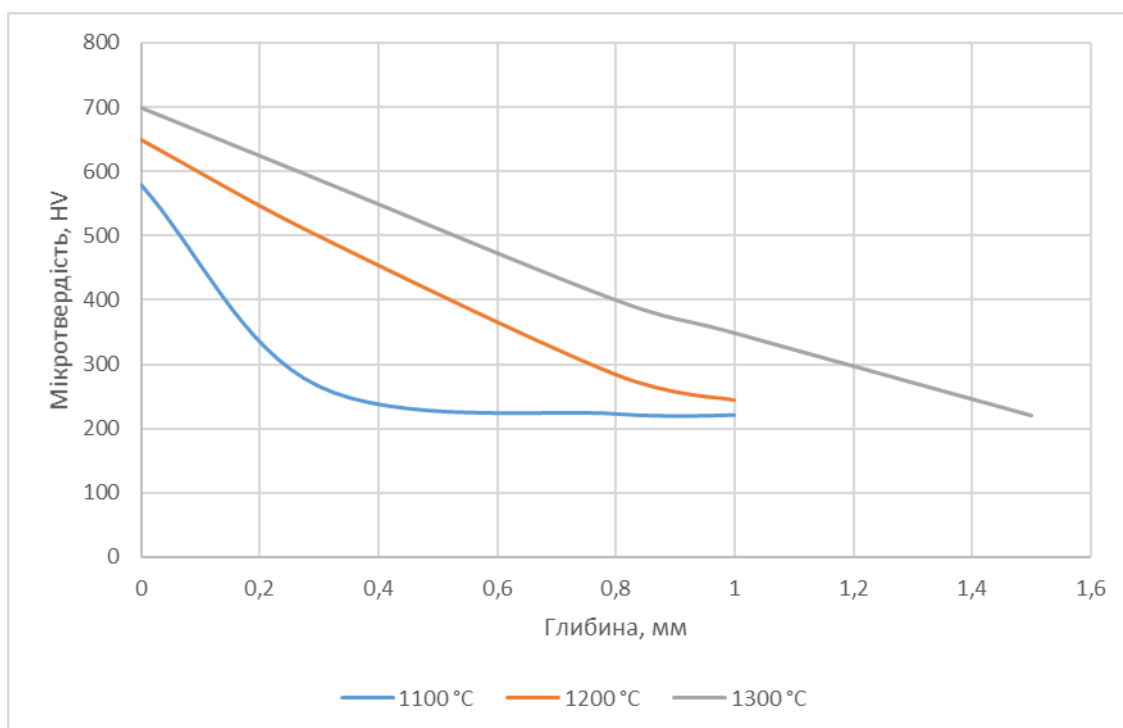


Рис. 4.6. Зміна мікротвердості від глибини при різних температурах нагрівання при 6 мм/с та 1750 Вт. [27]

Обробка відбувалася при сталих 1750 Вт початкової потужності та 6 мм/с швидкості. Аналіз результатів показує, що температури 1100 °C не достатньо для задовільного рівня мікротвердості на всій глибині загартованого шару. В цілому результати підтверджують правильність вибору температурного режиму при проведенні експерименту.

На таблиці приведено значення твердості сталей отриманих [26] в процесі експерименту при об'ємному та плазмовому загартуванні

Таблиця 4.1. Режими зміцнення та твердість сталей

Марка сталі	Режим об'ємного загартування		Твердість, HV		
	Тз, °C	Середовище охолодження	В вихідному стані	Після об'ємного загартування	Після плазмової обробки
45	850	Вода	165-180	620-635	805-815
50ХН	850	Масло	195-210	665-680	840-855
У8	800	Масло	205-220	740-755	865-885
М76	800	Вода	220-235	720-740	870-885
90ХФ	850	Масло	235-260	750-765	880-900
У10	800	масло	205-225	715-735	870-885

Згідно таблиці можна зробити висновок, що при використанні лазерного випромінювання при термічному зміцненні отримані найкращі значення мікротвердості зразків. В порівнянні з об'ємним загартуванням мікротвердість підвищується на 200-300 HV. В порівнянні з іншими високоенергетичними методами мікротвердість зразків зростає на 100-150 HV.

На зносостійкість колісних пар найбільший вплив має їх шорсткість та мікротвердість. Результати дослідження поверхні після термічного зміцнення наведено в таблиці.

Таблиця 4.2. Результати дослідження шорсткості поверхонь в зразках зі сталі М76 при різних режимах лазерної обробки

№ Експерименту	Швидкість обробки, мм/хв	Температура, °С	Ra, мкм	Rz, мкм
1	40	1200	1,704	8,920
2	90		1,118	8,104
3	140		1,316	8,261

Поверхнево-пластичне деформування було проведено з метою підвищення зносостійкості загартованих лазером деталей. Для подальшої обробки обрано зразки з найкращими показниками якості поверхні. Зразок, попередньо оброблений лазерним променем зі швидкістю 90 мм/хв та температурою нагрівання 1200 °С піддався дії деформуючого інструменту.

Обробка деформуючим інструментом полягає в зминанні поверхні наконечником з кубічного нітриду бору. Даний процес супроводжується зняттям верхнього шару матеріалу, згладжуванням поверхні та, як наслідок, значним зменшенням шорсткості поверхні, що продемонстровано в таблиці.

Таблиця 4.3. Результати дослідження шорсткості поверхонь в зразках зі сталі

М76, попередньо оброблених лазерним променем при різних режимах ППД

№ Експерименту	Подача, мм/хв	Частота обертання шпинделя	Ra, мкм	Rz, мкм
1	60	840	0,821	4,223
2	120		0,768	4,012
3	300		0,489	3,212

Згідно отриманих даних можемо зробити висновок, що найкращі показники шорсткості поверхні отримуються при збільшенні швидкості обробки. Мікротвердість матеріалу, обробленого на такому режимі зросла на 15% в порівнянні з термічним зміцненням, та майже в 5 раз в порівнянні з необробленим матеріалом.

На рисунках 4.7, 4.8 показано величини зносу матеріалу після випробовування на зносостійкість:

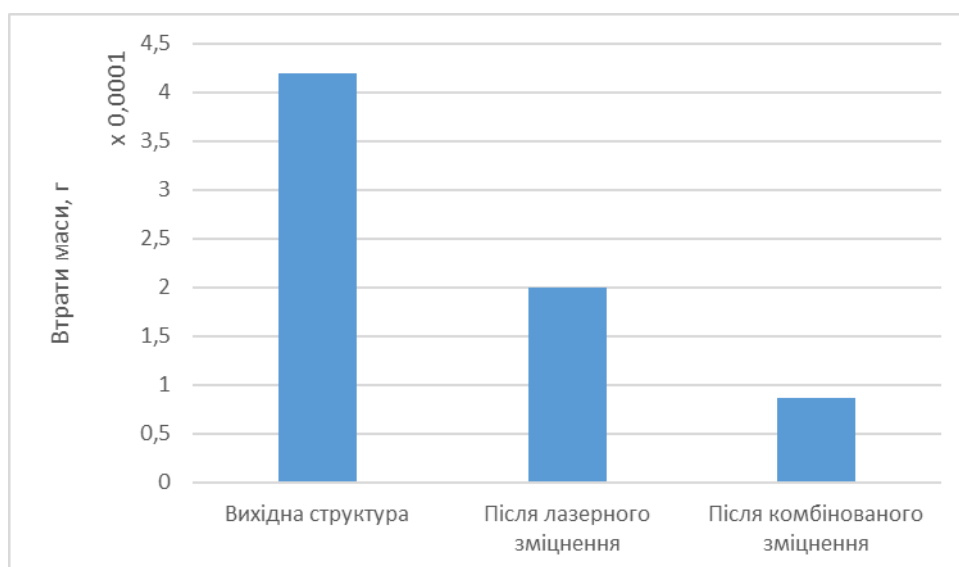


Рис 4.7. Порівняння втрати маси зразків з вихідною (необробленою) структурою, після термічного зміцнення та після комбінованого лазерного термореформаційного зміцнення.

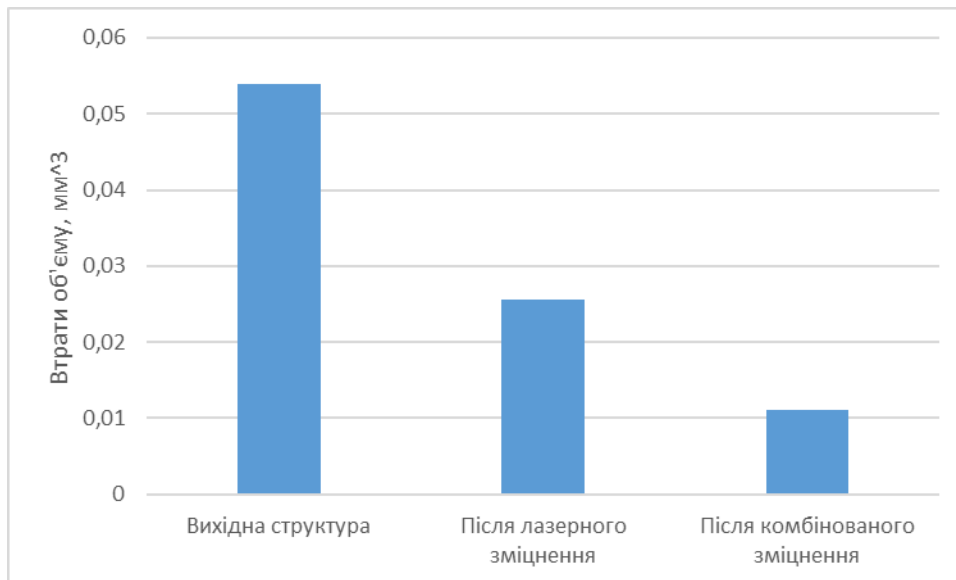


Рис. 4.8. Порівняння втрати маси зразків з вихідною (необробленою) структурою, після термічного зміцнення та після комбінованого лазерного термодіформувального зміцнення.

Згідно отриманих даних можемо зробити висновок, що зносостійкість зразків після лазерного зміцнення зростає вдвоє в порівнянні з вихідною структурою, а після комбінованого лазерного термодіформувального зміцнення зростає в 5 раз в порівнянні з необробленим зразком. Це може бути пояснено високими значеннями мікротвердості та поліпшеними умовами тертя в наслідок поліпшення якості поверхні контакту.

4.2. Схеми комбінованої лазерно-термодіформувальної обробки колісних пар.

Важливим напрямом дослідження процесу термодіформувальної обробки матеріалів є можливість застосувати технологію в умовах реальної деталі. Підвищення експлуатаційних властивостей є одною з найважливіших цілей при виробництві деталей, що працюють в важких умовах та в агресивних середовищах.

Основними параметрами, що потребують регулювання при обробці лазерним променем є температура нагрівання та швидкість охолодження металу. Дані параметри не є такими, які можна регулювати напряму, так як на них

впливають дуже велика кількість факторів – густина потужності лазерного випромінювання (W_p), швидкість обробки (V), форма і розміри п'ятна фокусування, розбіжність θ , модовий склад променя, теплофізичні та механічні властивості матеріалу, що обробляється (γ ; λ ; α ; E ; HV ; σ_t). На рисунку 4.9. показана схема процесу лазерної обробки як об'єкта регулювання.

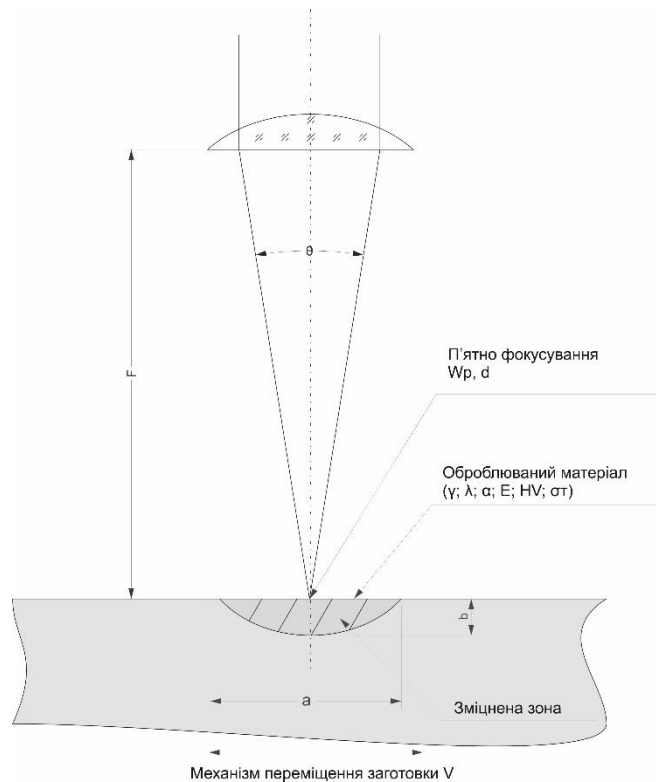


Рис. 4.9. Схема процесу лазерної обробки як об'єкта регулювання

Зміна факторів, що не є такими, що можна регулювати, можуть впливати температуру деталі, та як наслідок на кінцевий результат обробки. Доцільно проводити періодичний контроль температури, та корекцію режимів в процесі обробки за запропонованою схемою:



Рис. 4.10. Блок-схема процесу вибору режимів лазерної обробки

Параметрами, що визначають характеристики матеріалу після поверхнево-пластичного деформування є частота обертів робочого інструменту (v), подача при обробці (s), глибина обробки (h) механічні характеристики оброблюваного матеріалу (E ; HV ; σ_t ; Ra), інструмент (його механічні властивості та геометрія). На рисунку зображена схема поверхнево-пластичного деформування.

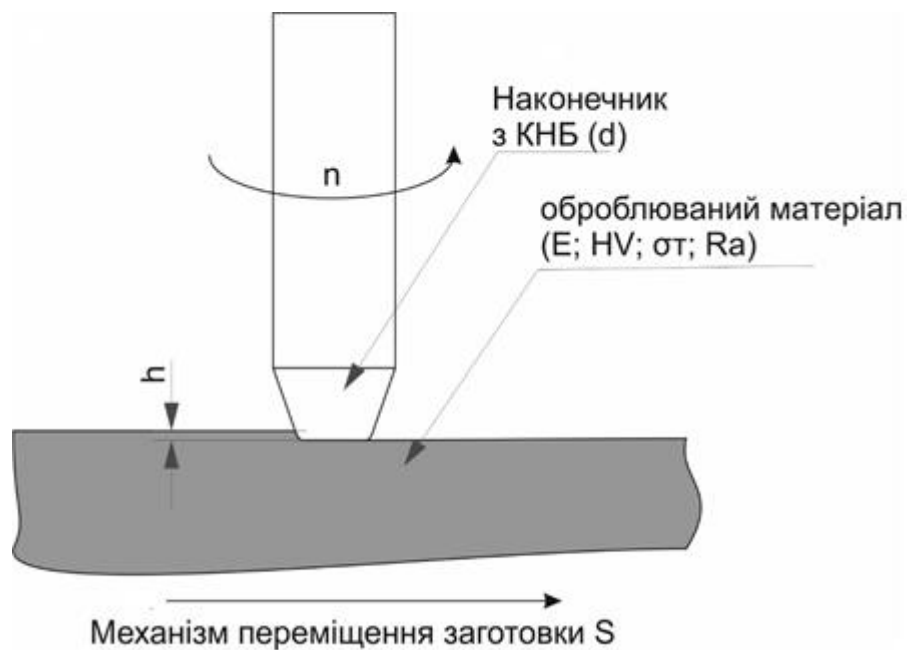


Рис. 4. 11. Схема процесу поверхневого деформування

Комбіноване лазерно-термодеформаційне зміцнення може виконуватися як за роздільною так і за сумісною схемою.

Використання сумісної схеми дозволяє проводити деформаційне зміцнення як і по охолоджену металу, так і при певній температурі. Для того, щоб обробка відбувається на певній відстані від джерела тепла, що визначається відштовхуючись від температури в зоні, де відбувається термічне модифікування, швидкості охолодження, подачі. В умовах виробництва така схема є бажаною, так як одночасне виконання двох операцій скорочує операційний час, що є економічно більш доцільним. Схема сумісної обробки наведена на рисунку:

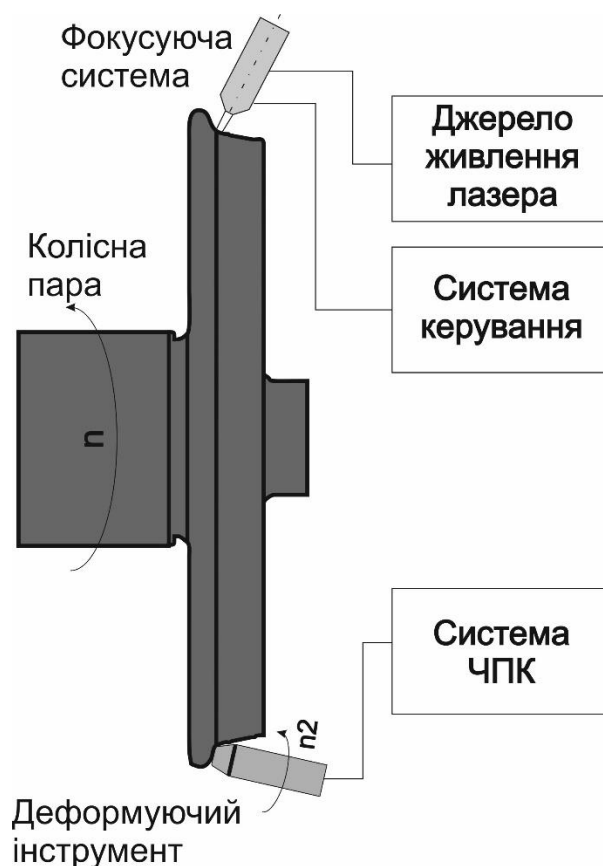


Рис. 4.12. Схема сумісної лазерно термо-деформаційної обробки колісної пари

До недоліків сумісної обробки можна віднести складність вибору режиму, оскільки деталь буде рухатися одночасно для обох процесів швидкість обробки лазера має співпадати з подачею при деформаційній обробці. В випадку якщо ця умова не може бути виконана має місце використання роздільної обробки, при якому процеси відбуваються окремо, незалежно один від одного.

Висновки до розділу 4

1. Металографічні дослідження сталі М76 після лазерного та комбінованого зміцнення дозволяє прослідкувати фазові та структурні перетворення. Досягається 4-4,5-ти кратне підвищення мікротвердості сталі при глибині в 0,3 мм після лазерного зміцнення, та в 5-5,5 раз після комбінованого зміцнення в порівнянні з вихідними 220-235 НV. Це пояснюється

дрібнодисперсною мартенситу через надвеликі швидкості охолодження.

2. Проведені вимірювання мікрорельєфу зразків після лазерної та після комбінованої обробки. ППД поліпшує значення шорсткості після термічної дії, тому поліпшує умови контакту пари колесо-рейка, та може бути фінішним етапом виготовлення.
3. Лабораторні дослідження показують зростання значення зносостійкості в 2 рази після лазерного зміцнення та в 5 раз після комбінованого зміцнення, що підтверджує актуальність та ефективність технології.
4. Приведено схему реалізації даної технології, що може слугувати основою для створення технологічного обладнання

РОЗДІЛ 5. Стартап-проект

Стартап -проект (форма малого ризикового підприємництва) впродовж останнього десятиліття набув широкого розповсюдження у світі через зниження бар'єрів входу в ринок (із розвитком інтернету як засобу популяризації та торгівлі стало простіше знаходити споживачів та інвесторів, займатись пошуком ресурсів, здійснювати діяльність між різними країнами), і вважається однією із найновіших складових інноваційної економіки, за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів кількість інноваційних ідей зростає. Створення та впровадження стартап-проектів має підвищене міру ризику. Ринково успішними стає лише невелика частка, що за різними оцінками складає 10%-20%. Сам по собі стартап-проект, не вартує майже нічого: головним завданням керівника проекту на початковому етапі його існування є перетворення ідеї проекту у працюючу бізнес-модель, що починається із формування концепції товару (послуги) для визначеної клієнтської групи за даними ринковими умовами.

Розроблення та виведення стартап-проекту на ринок передбачає здійснення певних кроків, в межах яких визначають ринкові перспективи проекту, графік та принципи організації виробництва, фінансовий аналіз та аналіз ризиків і заходи з просування пропозиції для інвесторів. Узагальнено етапи розроблення стартап-проекту можна подати таким чином.

Етапи розроблення стартап-проекту:

1. Маркетинговий аналіз стартап-проекту:

- розробляється опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів;

- на базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія

ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту;

- аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації;

2. Організація стартап-проекту:

- розраховується потреба в основних засобах та нематеріальних активах;

- складається календарний план-графік реалізації стартап-проекту;

- визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формулюється потреба у матеріальних ресурсах та персоналі;

- розраховуються загальні початкові витрати на запуск проекту та планові загальногосподарські витрати, необхідні для реалізації проекту.

3. Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту:

- визначається обсяг інвестиційних витрат;

- розраховуються основні фінансово-економічні показники проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту);

- визначається рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

- розрахунок основних фінансово-економічних показників проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту).

4. Заходи з комерціалізації проекту(цей етап спрямовано на пошук інвесторів та просування інвестиційної пропозиції):

- створення інвест-пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом;
- визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів;
- планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів;
- планування ресурсів для реалізації заходів з просування оферти.

В даному розділі буде виконано головний етап розроблення старпап-проекту, а саме маркетинговий аналіз, з метою виявлення ринкових можливостей використання результатів роботи. [28]

5.1 Опис ідеї послуги

Ідея послуги заключається в тому, щоб впровадити процес комбінованого зміцнення деталей в виробництві колісних пар. Послугу можна розширити, за рахунок поширення технології і на інші галузі машинобудування

Послуга може бути запропонована всім підприємствам, виробляють обладнання та комплектуючі, що працюють в агресивних середовищах.

Головною відмінністю даних послуг від існуючих аналогів та замінників є:

- пропонується використання технології, що дозволяє значно підвищити експлуатаційні властивості в порівнянні з аналогами, можливість обробки поверхонь будь-якої конфігурації.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Впровадження технології комплексного зміцнення для	1.Підвищення експлуатаційних властивостей колісних пар	Високі значення зносостійкості та терміну експлуатації

залізничної інфраструктури	2.Підвищення експлуатаційних властивостей рейок	Високі значення зносостійкості
Обробка деталей, що виготовлені з марганцевих сталей	1. Підвищення фізико-механічних властивостей пар тертя	Високі значення зносостійкості Висока якість поверхні
	2. Підвищення фізико-механічних властивостей фасонних поверхонь	Високі значення зносостійкості Висока якість поверхні. Висока точність обробки

4.2 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї

На сьогодні, лазерне термдеформаційне зміцнення деталей не має конкурентів, які могли б забезпечити подібні показники якості та зносостійкості поверхонь деталей. Одним з аналогів є плазмова обробка поверхонь, та вона не забезпечує такого рівня якості готового виробу.

Єдиним чинником, який може стати на заваді успішного розвитку впровадження технологій лазерного відновлення в промисловості може стати кінцевий користувач – покупець.

За схемою п'яти сил М. Портера, серед основних впливових факторів, які можуть стати на заваді з боку покупця – це рівень чутливості до зміни цін та витрати на виготовлення готової продукції, що зумовлено дороговизною процесу.

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Мій проєкт	Плазма	Виготовлення аналогів	Придбання запас. частин			
1.	Економія на масштабах	Так			Так			S
2.	Патенти на продукти	Так		Так	Так			S
3.	Розмір капіталовкладень	Так	Так	Так	Так			S
4.	Значення розміру поставок	Так	Так	Так	Так			W

Визначений перелік слабких W, сильних S та нейтральних N характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

4.3 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 4.3.):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/додати?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

	Ідея	Технолог	Наявність	Доступність
--	------	----------	-----------	-------------

п/п	проекту	ії її реалізації	ь технологій	ь технологій
	Впроваджен ня технології комплексного зміцнення для залізничної інфраструктури	Поверхне ва лазерно- термодеформа ційна обробка деталей	Наявна	Так
	Обробка деталей, що виготовлені з марганцевих сталей	Поверхне ва лазерно- термодеформа ційна обробка деталей	Наявна	Так
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Впровадження технології комплексного зміцнення для залізничної інфраструктури				

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок щодо можливості технологічної реалізації проекту: так чи ні, а також технологічного шляху, яким це доцільно зробити.

4.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 5.4.).

Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристи ка
-----	--------------------------------------	--------------------

п		
	Кількість головних гравців, од	2
	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Не відомо
	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Підвищення рентабельності підприємств, внаслідок використання технологій
	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Деталі, оброблені за даною технологією мають відповідати стандартам залізничного транспорту
	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30

Середня норма рентабельності в галузі (або на ринку) порівнюється із банківським відсотком на вкладення. За умови, що останній є вищим, можливо, має сенс вкласти кошти в інший проект. В нашому випадку, банківський відсоток на вкладення складає 20 відсотків, отже можна зробити висновок про те, що ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням.

Тепер доцільно визначити потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформулювати орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.5).

Таблиця 5.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Впровадження технології комплексного зміцнення для залізничної інфраструктури	Підприємств а важкого машинобудування, залізничні депо	Технічні умови щодо стану обробленої деталі	Якість виробу, строк служби деталі

4.5 Фактори, що сприяють ринковому впровадженню

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (таблиці 4.6 – 4.7). Фактори в таблиці подаються в порядку зменшення значущості.

Таблиця 5.6. Фактори загроз

п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
	Якість	Недотримання стандартів щодо якості поверхні після обробки	Зміна технологічних параметрів процесу
	Вартість	Перевищення витрат щодо виготовлення	Перемовини з клієнтом

Таблиця 5.7. Фактори можливостей

	Фактор	Зміст	Можлива реакція
--	--------	-------	-----------------

п/п		можливості	компанії
	Якість	Підвищення якості експлуатаційних властивостей	Зміна технологічних параметрів процесу.
	Вартість	Зменшення вартості виготовлення	Використання суміжної схеми обробки

Тепер проведемо аналіз пропозиції: визначимо загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.8.).

Таблиця 5.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - монополія/олігополія/ монополістична/ чиста	чиста	Створення аналогічних технологій
2. За рівнем конкурентної боротьби	міжнарод ний	Створення аналогічних технологій

3. За галузевою ознакою - міжгалузева/ внутрішньогалузева	міжгалузева	Поки немає відповіді
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова - товарно-видова - між бажаннями	Товарно-родова	Наша перевага в тому, що ми пропонуємо найкращі результати
5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова	нецінова	Репутація буде найкращою рекламою
6. За інтенсивністю - марочна/не марочна	не марочна	Джоб-шопи не є конкурентами, оскільки вони не можуть надати повний перелік послуг

Проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера, (таблиця 5.9.).

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Посачальники	Клієнти	Товар-замінник
	Інститути електрозвар	Визначити бар'єри входження в	Визначити фактори	Визначити фактори	Фактори загроз з

	ювання ім. Патона	ринок	сили постачаль ників	сили споживач ів	боку замінника
Ви сновки:	Партне рські засади	є можливості входу в ринок. Немає потенційних конкурентів, що могли б ввійти на ринок	Все залежить від ціни на обладнанн я та електроен ергію	Клі єнти не диктують умови роботи на ринку	Не має

За результатами аналізу таблиці зробимо висновок про те, що існує принципова можливість роботи на ринку з огляду на конкурентну ситуацію. Також можемо зробити висновок щодо характеристик (сильних сторін), які має наш проект, щоб бути конкурентоспроможним на ринку.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в таблиці 5.9., а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 5.2.), вимог споживачів до товару (табл. 5.5.) та факторів маркетингового середовища (табл. 5.6.-5.7.) визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз таких чинників представлено в таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
-----	----------------------------------	--

	Швидка адаптованість технології під запити покупця	Технологія дозволяє гнучко регулювати вихідні характеристики деталі
	Відсутність витратних матеріалів	Технологія не потребує покупки додаткових витратних матеріалів (порошків, електродів, тощо.)

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.10.) проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 5.11.).

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

п/ п	Фактор конкурентоспроможності	али 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів						
			3	2	1		1	2	3 +
	Швидка адаптованість технології під запити покупця	0							
	Відсутність витратних матеріалів	0							

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних “Strength” та слабких “Weak” сторін, загроз “Troubles” та можливостей “Opportunities” (табл. 5.12.) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.11.).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринку можливостей є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на вівміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів

потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Таблиця 5.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Всі фактори наведені в Таблиці 5.11.	Слабкі сторони: Вартість технологічного процеу
Можливості: Поширення технології і на інші деталі	Загрози: Вплив людського фактору на результат лазерного термодетформаційного зміцнення

На основі SWOT-аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. табл. 5.9, аналіз потенційних конкурентів).

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.13.).

Таблиця 5.1.Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

	Альтернатива	Ймовірність	Строки
--	--------------	-------------	--------

п/п	(орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	отримання ресурсів	реалізації
	Проведення демонстрації переваг технології із залученням іноземних партнерів	Велика імовірність отримання грантів від іноземних інвесторів	1-2 роки з моменту перших інвестицій
	Створення спільного підприємства	Невелика	4-5

Перша альтернатива містить в собі великі переваги і має всі шанси бути реалізованою., оскільки для неї отримання ресурсів є більш простим та ймовірним, а строки реалізації – більш стислими.

4.6 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14.).

Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
	Виробник	Готові	Оброб	низ	проста

	и локомотивів та вагонів		ка 30-40 коліс на місяць	ька	
	Виробник и рейок	Готові	Зміцне ння 100 км рейок на місяць	низ ька	проста
	Підприєм ства важкого машинобудува ння	Не готові	Не відомо	низ ька	проста
Які цільові групи обрано: Виробники локомотивів та вагонів, виробники рейок					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) обираємо стратегію диференційованого маркетингу;

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 5.15.).

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку

п/ п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспромо жні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
	Проведенн я демонстрації переваг технології із залученням	Диферен ційо-ваний маркетинг	Швидка адаптованість технології під запити покупця Відсутність	Страте гія диференці- ації

	іноземних партнерів		витратних матеріалів	
--	------------------------	--	-------------------------	--

Тепер виберемо стратегію конкурентної поведінки (табл. 5.16.).

Таблиця 5.2.Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
	Ні	Забирати існуючих у конкурентів	Ні	Стратегія виклику лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та допродукту (див. табл. 5.5.), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 5.15.) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16.) розробляємо стратегію позиціонування (табл. 5.17.). що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 4.3.Визначення стратегії позиціонування

п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
-----	---	---------------------------------	--	--

	Високі експлуатаційні властивості	Стратегія диференціації	Поширення технології і на інші деталі	Розроблена технологія, зростання зносостійкості, мінімальна фінішна обробка
--	-----------------------------------	-------------------------	---------------------------------------	---

5.7 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 5.18. потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.4. Визначення переваг концепції потенційного товару

п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
	Підвищення експлуатаційних властивостей деталей	Якість, зносостійкість.	Робота 24\7

На жаль через обмеженість інформації щодо наявних потреб українських споживачів було вирішено не створювати маркетингової кампанії для даної послуги. Наразі вивчається можливість просування цієї послуги компаніям за кордоном та створення в Україні хабу з відновлення деталей.

Висновки до розділу 5

- Наразі є можливість ринкової комерціалізації проекту (наявний скритий попит, динаміка ринку, рентабельність роботи на ринку);

- Також є перспективи впровадження з огляду на потенційні групи клієнтів, бар'єри входження, стан конкуренції, конкурентоспроможність проекту;
- Для ринкової реалізації проекту бажано обрати альтернативу «Проведення демонстрації переваг технології із залученням іноземних партнерів»
- Для впровадження проекту потрібно провести додаткові дослідження.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що деталі машин працюють в надвичайно складних, нестационарних умовах. Зокрема, при середньостатистичному навантаженні на вісь в 18 т, профілям коліс та рейок тиск на поверхні катання складає 600-800 Н/мм². Зусилля на гребнях/бокових частинах головки досягають 0,96 від нормальних навантажень на колесо/рейку, і хоч значення і одного порядку та внаслідок характеру взаємодії в результаті високих тангенціальних напружень, тертя від проковзування в гребнях коліс та боковій частині головки рейки створюються умови, що перевищують границі міцності/текучості, що призводить до різного виду зносу.
2. На основі проведеного аналізу літературних джерел встановлено переваги та недоліки методів підвищення фізико-механічних властивостей деталей, що базуються як на фізичних, хімічних, механічних методах обробки, так і тих, що полягають в нанесенні шару матеріалу з зовсім іншим хімічним складом. Найкращих результатів можна отримати комбінованою дією лазерного випромінювання та деформаційного.
3. Попереднє визначення оптимальної температури лазерної обробки проводилося при використанні трикомпонентної діаграми залізо-вуглець-марганець, більш точних значень критичних точок досягнуто з використанням термодинамічної моделі.
4. Проведеними експериментальними дослідженнями приповерхневого шару після лазерного та комбінованого термодформаційного зміцнення встановлено 4-4,5-ти кратне підвищення мікротвердості сталі М76 на глибині 0,3 мм після лазерного зміцнення, та в 5-5,5 раз після комбінованого зміцнення в порівнянні з вихідними, за рахунок утворення дрібнодисперсної мартенситної структури, яка утворена при

значних швидкостях охолодження.

5. Встановлено, що ППД поліпшує після лазерної термічної обробки поліпшує значення шорсткості в 2-3 рази, яка сприятиме поліпшення умови контакту пари колесо-рейка, та може бути фінішним етапом виготовлення.
6. Запропонований комбінований метод лазерного термдеформаційного зміцнення дозволяє підвищити зносостійкість колісної пари в 2 рази після лазерного зміцнення та в 5 раз після комбінованого зміцнення в порівнянні з вихідними даними.
7. Запропоновано схему реалізації даної технології, та стартап-проект впровадження її на підприємствах залізничної інфраструктури та важкого машинобудування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. Краушав, Ф. Колеса во взаимодействии с рельсами [Текст]/ Ф. Краушав // Железные дороги мира. – 1998. – № 11. – С. 66–69.
2. <http://vse-lekcii.ru/zheleznodorozhnyj-transport/zheleznodorozhnyj-put-i-putevloe-hozyajstvo/vzaimodejstvie-puti-i-podvizhnogo-sostava>
3. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса: пер. с англ. У Дж. Харрис и др. М.: Интекст, 2002. 408 с.
4. Воробьев А. А. Контактное взаимодействие колеса и рельса // Вестник ИрГТУ №3 (39) – 2009 – с. 42-47.
5. <http://moodle.ipo.kpi.ua/moodle/mod/resource/view.php?>
6. Химико-термическая обработка металлов. Учебное пособие для вузов. Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
7. Акимов О. В. Улучшение эксплуатационных свойств деталей лазерным поверхностным легированием / О. В. Акимов, Фадил Адан Алаа // СУЧАСНЕ ПРОМИСЛОВЕ ТА ЦИВІЛЬНЕ БУДІВНИЦТВО - 2015. – Том 11, № 39. - С. 131-137.
8. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2006. – 664 с.
9. Кралін А. К. Методи пластичного деформування поверхневого шару деталей машин / А. К. Кралін, Р. І. Рибалко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Серія : Нові рішення в сучасних технологіях. - 2015. - № 39. - С. 3-8.
10. Методичні вказівки для виконання лабораторних та практичних робіт з курсу «Технологія конструкційних матеріалів». Розділ «Обробка металів тиском» [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. В. В.

- Джемелінський, Ю. В. Ключников, О. Т. Сердітов, О. Д. Кагляк, П. В. Кондрашев. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 62 с.
11. ТИМОФЕЕВ С. С. Способы и методы модификации поверхностей трения // ИКСЗТ – 2015. - №3 – с. 20 – 23.
12. Ковальчук Ю. О. Огляд використання лазерного зміцнення сталі 45 для підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарської техніки // Вісник аграрної науки Причорномор'я – 2012 – Випуск 2 – с. 172 – 181.
13. http://plazer.com.ua/docs/pdf/plazm_tach_upr.pdf
14. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов, Н.Я. Парканский и др. / Под ред. Ю.Н. Петрова. - Кишинев: ШТИИНЦА, 1985. – 196 с. Цеков В.И. Основы восстановления деталей металлургического оборудования. - М.: Металлургия, 1984. – 328 с.
15. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение. 2008. - 320 с.: ил
16. Коваленко В.С., Головки Л.Ф., Черненко В.С. Зміцнення та легування деталей машин променем лазера. К., Техніка, 1991, 192с.
17. Vogel R., During W. System Eisen – Zementit – Mangankarbid – Mangan. «Archiv fur das Eisenhüttenwesen», 1985. Jahrgang 9, H. 6, S.247.
18. Laser transformation hardening effect on hardening zone features and surface hardness of tool steel AISI D2 / [D. A. Lesyk, V. V. Dzhemelinskyi, S. Martinez, etc.]. // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – №1(79). – P. 26–33.
19. Данилейко О.О. Поліпшення якості поверхневого шару сталі 30ХГСА комбінованою лазерно-деформаційною обробкою / Данилейко О.О., Джемелінський В.В., Лесик Д.А.. // XVIII ПРОГРЕСИВНА ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ ТА ІНЖЕНЕРНА ОСВІТА. – 2017. –с. 239–240.
20. <http://www.evek.org/materials/stal-76-m76.html>
21. Yazıcı O. Surface hardening of R260 grade rail steels with high power diode laser / O. Yazıcı, S. Yılmaz. // UCTEA Chamber of Metallurgical & Materials Engineers. – 2016. – С. 982–985.
22. Laser transformation hardening effect on hardening zone features and surface

hardness of tool steel AISI D2 / [D. A. Lesyk, V. V. Dzhemelinskyi, S. Martinez, etc.]. // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2017. – №1(79). – P. 26–33.

23. Тылкин М. А. Справочник термиста ремонтной службы / М. А. Тылкин. – М: Металлургия, 1981. – 648 с. 121. *Металловедение и термическая обработка стали и чугуна* / под ред. А. Г. Рахштадт. – М.:Интермет инжиниринг, 2004. – 687 с.
24. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Износостойкость сталей и сплавов: учебное пособие для вузов. — М, Нефть и газ, 1994. — 417 с.: ил. 246.
25. . Матафонов А.В., Пыко А.Н., Ильиных А.С. Технологическое обеспечение качества поверхности рельсов при шлифовании в условиях железнодорожного пути // *Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер.: Машиностроение*. – 2015. – № 1. – С. 80–92.
26. Гагарин В. А. Совершенствование технологических систем плазменного градиентного упрочнения крупногабаритных стальных изделий : дис. канд. техн. наук / Гагарин Владимир Александрович – Мариуполь, 2016. – 147 с.
27. Yazıcı O. Surface hardening of R260 grade rail steels with high power diode laser / O. Yazıcı, S. Yılmaz. // *UCTEA Chamber of Metallurgical & Materials Engineers*. – 2016. – С. 982–985.
28. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.]
29. Головка Л. Ф. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання / Під ред. Л. Ф. Головка, С. О. Лук'яненко. – К.: Вістка, 2009. – 296 с.